

Analyse von dispositiven Eingriffen im Schienenverkehr durch Computersimulation

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplominformatiker

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT
INSTITUT FÜR INFORMATIK

eingereicht von: Carsten Matthias Otto
geboren am: 14.04.1986
in: Berlin

Gutachter: Prof. Dr. Joachim Fischer
Dr. Michael Ummels (DLR)

eingereicht am: verteidigt am:

Zusammenfassung

Das Bewusstsein für „Energieverbrauch“ steigt zusammen mit den Kosten für Energie, egal ob als Strom oder fossile Brennstoffe. Der Zug gilt als emissions-ärmstes Verkehrsmittel für den Transport von Gütern und Personen innerhalb Europas. Um eine im zunehmenden Güter- und Personenverkehr wettbewerbsfähige Alternative zum flexiblen Straßenverkehr zu sein, gilt es die Kosten und Verspätungen möglichst gering zu halten. Da der Bahnverkehr ein geplanter Verkehr ist, soll durch effiziente Pläne und zeitnahe Anpassung dieser Pläne an Veränderungen der Situation ein optimaler Betriebsablauf gewährleistet werden. Das Streckennetz der Bahn stellt eine nur unter hohem Kosten- und Zeitaufwand veränderbare Größe dar, deshalb gilt es außerdem die Kapazität hoch belasteter Streckenabschnitte möglichst zu erhöhen. Da ein möglichst gleichförmiger Fluss wie im Straßenverkehr eine Reduktion von Fahr- und Wartezeiten sowie des Energieverbrauchs mit sich bringt, sorgt die Vermeidung von unnötigen Halte- und Anfahrvorgängen bereits für eine Annäherung an die genannten Ziele. Diese Vermeidung lässt sich nur durch exakte Kenntnis und Planung der Betriebssituation erreichen.

Die Diplomarbeit beschäftigt sich daher mit der Durchführung eines nach den oben genannten Kriterien optimierten Betriebs. Dazu wird ein dokumentiertes Verfahren zum Vergleich von verschiedenen Szenarien des bereits geplanten Bahnbetriebs auf einem Streckenabschnitt geschaffen. Diese Szenarien stellen mögliche Eingriffe von Disponenten in Störungs- bzw. Konflikt-Situationen dar und werden anhand der Kriterien Pünktlichkeit und Energieverbrauch bewertet.

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand in Anregung und mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR in Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt deswegen Herrn Schumann und Herrn Dr. Ummels für die regelmäßige Zusammenarbeit. Durch diese kam die Entwicklung des Simulationsmodells sukzessive voran, auch nachdem die Entwicklung des OVM-Tools in eine andere Richtung ging.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Fischer, Herrn Blunk und Herrn Eveslage vom Lehrstuhl für Systemanalyse bedanken, die es mir möglich machten diese Arbeit zu schreiben und mich bei der Planung und Erstellung unterstützten.

Meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden danke ich insbesondere für ihre Geduld, die in dieser Zeit nötig war.



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	4
2.1. Elemente des Bahnverkehrs	4
2.1.1. Schienennetz	5
2.1.2. Fahrzeuge	7
2.1.3. Personen	8
2.1.4. Leit- und Sicherungstechnik	9
2.1.5. Zugbeeinflussungssysteme	12
2.1.6. Entwicklungen / ETCS	14
2.1.7. Fahrplan	15
2.2. Abweichungen vom geplanten Betrieb	17
2.2.1. Störungen	17
2.2.2. Konflikte	19
2.2.3. Konfliktlösungen	20
2.3. Grundlagen der Simulation	23
2.3.1. Modellierung	24
2.3.2. Prinzipien	25
2.3.3. ODEmx	27
2.3.4. SLX	28
3. Motivation und Situation	34
3.1. Das Projekt PiLoNav	34
3.1.1. Zielstellung	34
3.1.2. Operatives Verkehrsmanagement	35
3.2. Simulation und Fahrplanerstellung im Bahnverkehr	35
3.3. Anforderungen an ein Simulationsmodell	37
3.3.1. Kriterien zur Berechnung	37
3.3.2. Anforderungen und Beschränkungen	38
3.3.3. Größe und Anzahl der Elemente	38
3.3.4. Komplexitätsbetrachtung der Überholung	39
4. Lösungsansatz	40
4.1. Simulationsmodell	40
4.1.1. Netz-Klassen	41
4.1.2. Fahrt-Klassen	43

Inhaltsverzeichnis

4.1.3. Fahrphysik	45
4.1.4. Ablauf	48
4.1.5. Bewertungsfunktion	51
4.2. Eingabedaten	53
4.2.1. Zugprofile	54
4.2.2. Netz	56
4.2.3. Fahrplan	56
4.3. Ausgabedaten	57
4.3.1. Logging	57
4.3.2. Proof Animation	58
4.4. Bemerkungen zu SLX	60
5. Auswertung	61
5.1. Bewertung der Simulationsergebnisse	61
5.1.1. Reduktion von Verspätungen	62
5.1.2. Reduktion des Energieverbrauchs	65
5.1.3. Analyse der Streckenauslastung	65
5.2. Bewertung des Simulationsmodells	66
5.3. Ausblick / Erweiterungen	67
6. Fazit	70
A. Anhang	71
A.1. Berechnung der maximal möglichen Varianten	71
A.2. Berechnung der notwendigen Geschwindigkeit	71
A.3. Proof Animation	74
A.4. Inhaltsverzeichnis der CD	75

Abbildungsverzeichnis

1.1. Bildfahrplan (aus [16], vertikal: Zeit, horizontal wie Spurplan: Weg)	2
2.1. Spurplan-Graph aus [14]	5
2.2. Zugkraftkennlinienfeld aus [17]	9
2.3. Sperrzeit für durchfahrenden Zug aus [23]	10
2.4. Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit aus [16]	12
2.5. Konflikt nach Bahnhof aus [16]	21
2.6. Konfliktlösung durch Warten aus [16]	22
4.1. Übersicht der Dateien des Simulationsmodells	41
4.2. Klassendiagramm: Netz (nur Attribute zur Nutzungsbegrenzung)	42
4.3. Klassendiagramm: Zug, Fahrplan und Geschwindigkeitsprofile	44
4.4. Teil der berechneten Fahrt des ME 81601	45
4.5. Teil der berechneten Fahrt des ICE 581 (folgt ME 81601)	46
4.6. Ablauf über Simulationsläufe hinweg	48
4.7. Ablauf eines Simulationslaufs	49
4.8. Zusammenhang der Simulationsläufe	51
4.9. Übersicht über die Ein- und Ausgabedateien	54
4.10. Proof Animation: Spurplan mit Diagramm	59
4.11. Proof Animation: Zeit-Weg-Linie mit Sperrzeit	59
5.1. IC 2175 im ersten Simulationslauf ohne Überholungen	62
5.2. IC 2175 im Simulationslauf mit der geringsten Verspätung	63
5.3. IC 2173 bei Winsen (Luhe) (ohne Überholung)	63
5.4. IC 2173 ab Uelzen mit ME 82841 (ohne Überholung)	64
5.5. IC 2173 ab Uelzen mit ME 82841 (mit Überholung)	64
5.6. Ausgabe Spurplan mit Auslastungen	66
A.1. Proof: Ausgabe über einen Kalendertag (ohne Überholungen)	74

Tabellenverzeichnis

2.1. Störungen: Ursache - Wirkung (basierend auf [28] und [1])	19
2.2. Die möglichen Folgen von Störungen	20
2.3. Properties von SLX-Klassen	29
3.1. Verfahren/Programme zum Betriebsablauf	36
4.1. Beispiel aus FBS-Export: ein IC mit und ohne Reserve	55
A.1. Inhalt der CD	75

1. Einleitung

Der Bahnverkehr befindet sich in Konkurrenz zum Straßen-, Luft- und Schiffsverkehr. Für die Konkurrenzfähigkeit ist es von Bedeutung, einen schnellen und ökonomischen Transport zu ermöglichen und dabei vorhandene Kapazitäten effizient zu benutzen. Die Überwachung und Steuerung des Betriebsablaufs findet für viele wichtige Achsen in Deutschland mittlerweile in Betriebszentralen statt. Dort oder in den Stellwerken muss ggf. auf Störungen reagiert werden. Ursachen dafür können an der Strecke, den Fahrzeugen oder bei Mitarbeitern oder Fahrgästen liegen. Durch Störungen kann die Leistung des Netzes gesenkt und Pünktlichkeit eingebüßt werden. Pünktlichkeit und damit Zuverlässigkeit ist insbesondere für das Image des Bahnverkehrs (vgl. S-Bahn Berlin) und damit dessen Akzeptanz allerdings von Bedeutung.

Die Erfassung der Position von Zügen ermöglicht die Erkennung von Abweichungen im Betriebsablauf. Diese Abweichungen vom Fahrplan können je nach Größe und Zusammenspiel zu weiteren Problemen führen. Es können geplante Anschlüsse nicht gehalten werden oder Personal oder Züge stehen für folgende Fahrten verspätet zur Verfügung. Weiterhin können zeitliche Überschneidungen zweier Züge bei der Nutzung von Ressourcen des Streckennetzes entstehen, hierbei wird von (Belegungs-) Konflikten gesprochen. Da Züge in Deutschland im Blockabstand fahren, findet die Einteilung des Netzes in Blockabschnitte statt, die je nach Art der Zugbeeinflussung z. B. als die Strecke zwischen zwei Hauptsignalen definiert ist. Diese Blockabschnitte sind zu einem Zeitpunkt nur von maximal einem Zug zu befahren.

Soll ein Zug langsamer als geplant fahren, um vorausschauend auf einen Belegungskonflikt zu reagieren, so wird von *Verbiegen* gesprochen, da sich die Zeit-Weg-Linie des wartenden Zuges (und ggf. folgender Züge) nach hinten verschiebt bzw. „verbogen“ wird (veränderte Steigung). Die Zeit-Weg-Linie beschreibt die Position eines Zuges zu bestimmten Zeitpunkten. Die Menge an Zeit-Weg-Linien in einem bestimmten Bereich ist eine übliche Darstellungsform für Disponenten im Bahnverkehr (siehe Abbildung 1.1). Die Darstellung besteht meist zu einem Teil aus den tatsächlichen Positionen in der Vergangenheit und der Prognose anhand des Fahrplans (Bildfahrplan). Der Fahrplan selbst beschreibt einen eigentlich konfliktfreien Betriebsablauf.

Ein Ziel des Projekts PiLoNav, ist die Erzeugung von Vorschlägen zur Lösung entstandener bzw. prognostizierter Konflikte und von Fahrempfehlungen für Triebfahrzeugführer. Als Grundlage dienen kontinuierliche Ortungsinformationen.¹ Die

¹PiLoNav: *Precise and integer Localisation and Navigation in Rail and Inlandwater Traffic*, siehe DLR [7]

1. Einleitung

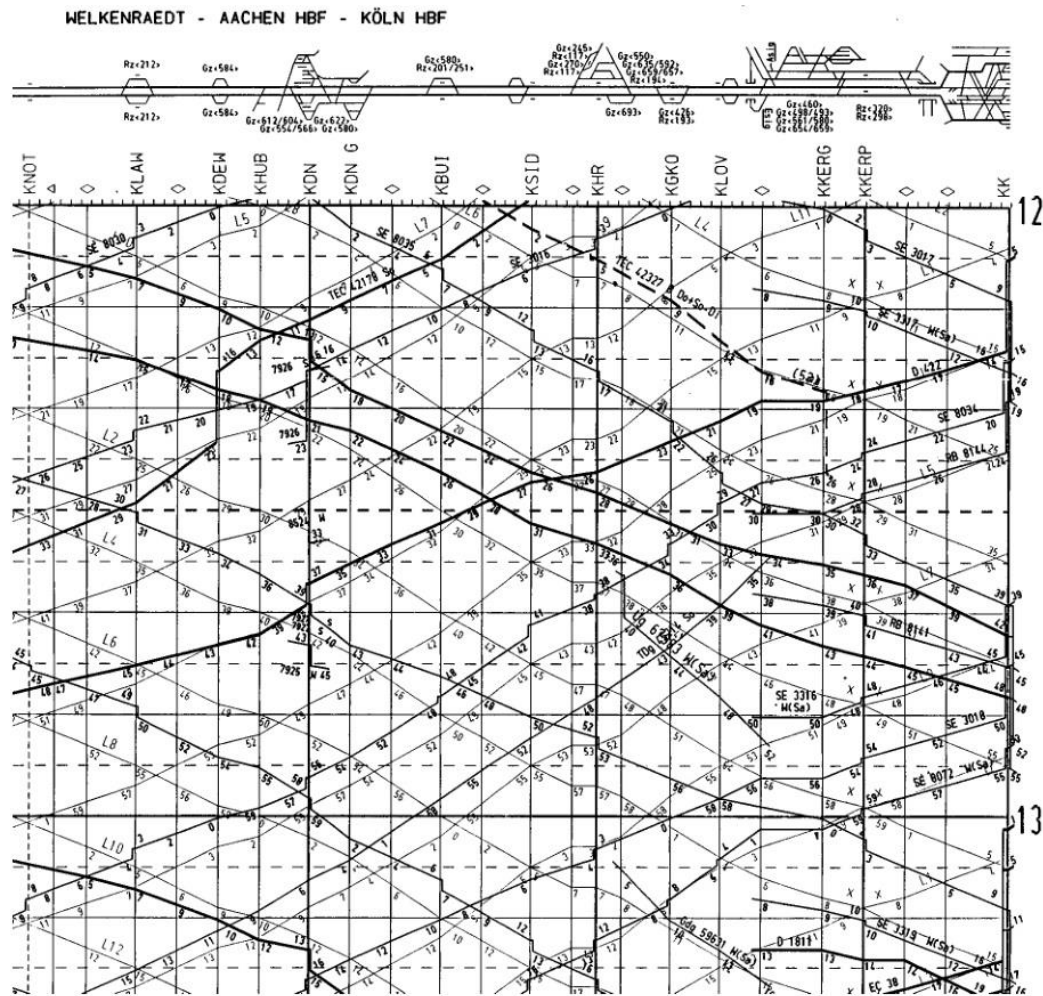


Abbildung 1.1.: Bildfahrplan (aus [16], vertikal: Zeit, horizontal wie Spurplan: Weg)

Fahrempfehlungen sollen den Betrieb auf Energieeffizienz und minimale Verspätung hin optimieren. Eine starke Beschleunigung vor Erreichen eines belegten Blockabschnitts ist bspw. nicht oder nur selten empfehlenswert.

Ziel der Diplomarbeit ist die Analyse existierender Verfahren zu Konfliktermittlung und -lösung und von Strategien zur Konfliktlösung. Durch ein zu entwickelndes Simulationsmodell sollen die Ergebnisse verschiedener Dispositionsstrategien ermittelt werden können. Das Ergebnis der Anwendung einer Strategie soll auch mit dem Ergebnis des Verbiegens verglichen werden können. Um die auf diese Art unterschiedlichen Simulationsläufe zu vergleichen, muss ein Ansatz zur Bewertung entwickelt werden. Die Bewertung dient ggf. auch zur Verkürzung der Simulationslaufzeit, da je nach Ziel der Optimierung suboptimale Versuche frühzeitig abgebrochen werden

können. Im Unterschied zu anderen Verfahren sollen dabei die Züge nicht nach ihren klassischen Prioritäten (z. B. ICE vor RE) disponiert werden, sondern wenn möglich ein erweiterbarer Satz an Regeln verwendet werden.

Die Simulationen werden mithilfe der Simulations-Umgebung *SLX* (Wolverine Software) ausgeführt. *SLX* unterstützt die ereignisbasierte Simulation u. a. durch Implementation von beschränkten Ressourcen (z. B. bekannte Elemente aus GPSS/H wie *FACILITY*), welche bei unerlaubtem (parallelem) Zugriff weitere Zugriffe blockieren. In der Zeit der Blockierung bis zur Freigabe wird Modellzeit verbraucht und das zugreifende Objekt wartet in der Regel (etwa zum Fahren im Blockabstand). Zu der Software-Sammlung von Wolverine Software gehören mit *Proof Animation* auch Umgebungen zur grafischen Darstellung der Ergebnisse. Diese erlauben eine visuelle Evaluation der Simulationsläufe durch das Zeichnen der sich ergebenden Zeit-Weg-Linien mit weiteren Informationen.

Die Diplomarbeit bietet nach der Einleitung in Kapitel 2 eine Einführung in die Grundlagen des Bahnverkehrs und Ursachen und Lösungen für Abweichungen von dessen Fahrplan. Darüber hinaus gibt es einen Überblick über die Methoden der Simulation. Es wird kurz gezeigt wie man von einem konkreten Problem zu einem ausführbaren Simulationsmodell gelangt. In dem Abschnitt werden auch unterschiedliche Implementierungen bzw. Bibliotheken zur Simulation vorgestellt. In Kapitel 3 geht es dann um das Projekt PiLoNav, das Motivation für diese Arbeit war. Vorhandene Lösungen zur Berechnung bzw. Simulation des Bahnverkehrs werden erläutert, da die Art ihrer Umsetzung ggf. als Vorlage dienen kann. Es ergeben sich weiterhin aus PiLoNav und dem Bahnverkehr die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell. Die Kriterien, welche ausgewertet werden sollen, und die mögliche Einflussnahme auf das Modell werden zusammengefasst.

Kapitel 4 stellt dann das Simulationsmodell vor. Dazu werden die Klassen vorgestellt und die Fahrphysik abgebildet. Darauf folgen der Ablauf der Simulation und damit die Umsetzung der Konfliktlösungsstrategien. Um das Modell zu evaluieren und eine Simulation durchzuführen, werden außerdem konkrete Testdaten erzeugt. Abschließend geht es in Kapitel 5 um die Bewertung des Modells und die Analyse der Simulationsergebnisse und -ausführung. Dort wird weiterhin ein Ausblick über mögliche Verbesserungen oder Erweiterungen am Modell oder Auswirkungen der Simulationsergebnisse auf eine Anwendung zur Optimierung des Bahnverkehrs gegeben. In Kapitel 6 wird diese Arbeit abgeschlossen und ein Fazit gezogen.

2. Grundlagen

Zur Entwicklung eines Simulationsmodells werden in diesem Kapitel in Abschnitt 2.1 die statischen und dynamischen Elemente des Bahnverkehrs in Deutschland beschrieben. Der Bahnverkehr ist ein spurgebundener und geplanter (wenn auch nicht immer planmäßig ablaufender) Verkehr. Er steht im Bereich des Güterverkehrs hauptsächlich in Konkurrenz zum interregionalen und internationalen LKW-Verkehr. In Bezug auf den Personenverkehr steht der PKW (und zunehmend auch der Fernbus) in Konkurrenz zum Zug. Insbesondere im wachsenden Güterverkehr ([4]) ist der Zug jedoch das umweltfreundlichere Verkehrsmittel (siehe auch [24]), weswegen in Projekten wie PiLoNav die Leistungsfähigkeit und Effizienz erhöht werden soll. Ziel ist es, dem insgesamt zunehmenden Güter- und Personenverkehr gerecht zu werden und ggf. weitere Anteile auf den Zug (und die Binnenschifffahrt) zu verlagern.

Da insbesondere Abweichungen vom planmäßigen Verlauf den Bahnverkehr vor Herausforderungen stellen, werden in Kapitel 2.2 die Ursachen und mögliche Lösungen für Störungen vorgestellt. In Abschnitt 2.3 folgen die Grundlagen der Simulation, da die Prognose und möglichst optimale Lösung von Konflikten eine Simulation des Bahnbetriebs notwendig macht. Dazu werden zuerst die Arten von Simulationen unterschieden. Darauf folgt eine Strategie für die Umsetzung eines realen Problems in ein Simulationsmodell und die Vorstellung von Simulationsbibliotheken, welche die Entwicklung erleichtern.

2.1. Elemente des Bahnverkehrs

Der Bahnbetrieb wird für die folgende Modellerstellung mit seinen für das zu untersuchende Verhalten relevanten Aspekte vorgestellt. Das Schienennetz bietet die Grundlage auf dem der Betrieb stattfindet. Dazu gehören auch die Knotenpunkte (Bahnhöfe und *Betriebsstellen*), welche für den Ein- oder Ausgang der Nutzer (Waren, Passagiere) aus dem Netz oder dessen Regelung verantwortlich sind. Zustand und Aufbau des Schienennetzes sind entscheidend für seine Leistungsfähigkeit zwischen den Knotenpunkten. Innerhalb des Netzes bewegen sich die Fahrzeuge und das dazugehörige Personal, welche damit den Fluss darstellen. Zur Regelung des Bahnverkehrs dient die Leit- und Sicherungstechnik, welche sich aus den ortsfesten Betriebsstellen und ggf. Fahrzeugkomponenten zusammensetzt.

2.1.1. Schienennetz

Die Fahrwege und Regelungsanlagen werden in Deutschland zum großen Teil von der DB Netz AG betrieben. Diese ist auch für den Verkauf von Fahrplantrassen an die jeweiligen Logistik- und Verkehrsunternehmen verantwortlich. Trotz der Zugehörigkeit der DB Netz AG zur Deutschen Bahn soll den nicht zur Deutschen Bahn gehörigen Verkehrsunternehmen eine gleichberechtigte Bestellung von Fahrplantrassen möglich sein. Dies hat auch Auswirkungen auf die zum Bahnbetrieb notwendige Fahrplanerstellung.

Wichtig für eine Simulation des Bahnbetriebs ist außerdem der Aufbau des Netzes und die damit verbundene Beschränkung der Flüsse innerhalb dessen.

Das Netz besteht grundlegend aus Gleisen und Weichen, welche einen Wechsel zwischen den Gleissträngen in bestimmten Richtungen möglich machen. Ist die zum Gleis gehörige Strecke elektrifiziert, befindet sich (Nahverkehre ggf. abweichend) eine Oberleitung über dem Gleis. Weiterhin können sich die Spurbreiten unterscheiden, was z. B. an der weißrussischen Grenze Fahrwerk-Wechsel oder -Einstellung notwendig macht. Diese Arbeit konzentriert sich jedoch auf den regulären deutschen Bahnverkehr. Das Netz wird hier, von der geometrischen Darstellung abstrahiert, als Spurplan dargestellt. Der Spurplan-Graph beinhaltet neben den Gleisen und Weichen je nach Detailgrad Angaben zu Neigung, Leit- und Sicherungstechnik und zu deren (Aus-)Richtung wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Dort ist ein Kreuzungs-Bahnhof zu sehen, welcher über einen Bahnsteig je Richtung verfügt und an einer eingleisigen Strecke liegt.

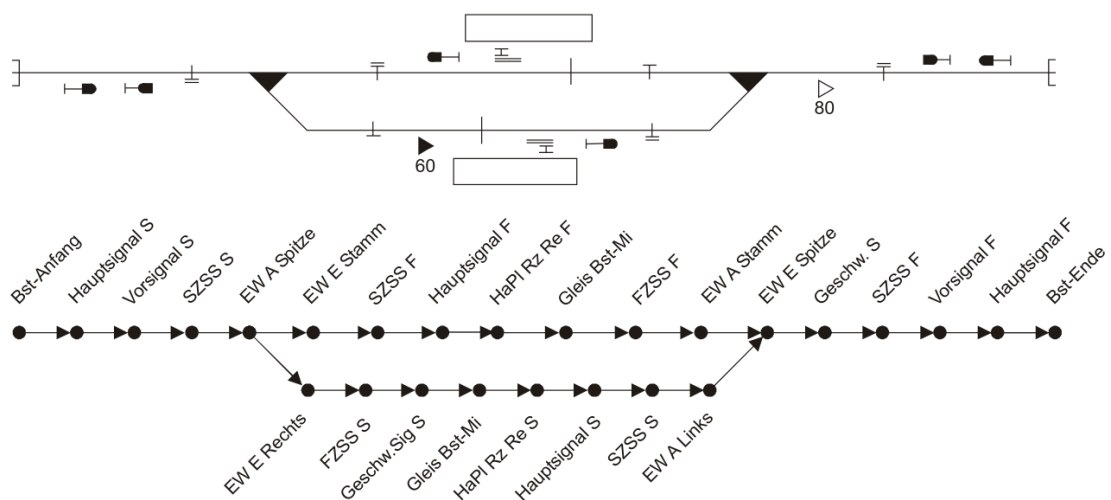


Abbildung 2.1.: Spurplan-Graph aus [14]

Alle Angaben werden als Knoten des Netzes abgelegt, sodass jedes Element des Netzes oder Änderung seiner Eigenschaften (Steigung) eine definierte Position innerhalb

2. Grundlagen

des Spurplan-Graphen hat. Die Bezeichnung *S* und *F* hinter den schriftlichen Angaben im Graphen beschreibt die Ausrichtung der Knoten, welche sonst durch die Symbole visualisiert wird. Bei steigender (*S*) Kilometrierung ist die Ausrichtung der Elemente in Kantenrichtung, bei fallender (*F*) Kilometrierung entgegengesetzt. Demnach ist z. B. in der Abbildung zu erkennen, dass die beiden Vorsignale sich nicht auf die „benachbarten“ Hauptsignale beziehen, sondern auf die Hauptsignale in Bahnsteignähe, da diese in der jeweiligen Fahrtrichtung folgen. Vorsignale sind für die Vorbereitung der Fahrt auf ein Hauptsignal entscheidend, da Züge je nach Geschwindigkeit/Witterung nicht innerhalb Sichtweite des Hauptsignals zum Stillstand gebremst werden können. Die Hauptsignale geben vergleichbar zu der Ampel im Straßenverkehr ggf. den verbindlichen Haltebefehl. Diese liegen (auch im Spurplan-Graphen der Abbildung) vor dem Bahnhof und am in jeweiliger Fahrtrichtung befindlichen Ende der Bahnsteige.

Für den automatisierten Betrieb der Signalanlagen ist es von Bedeutung, ob ein Zug den Bahnhof befahren und/oder verlassen hat. An den dafür festgelegten Fahrstraßenzugschlussstellen (FZSS) bzw. an den Signalzugschlussstellen (SZSS) hinter Hauptsignalen befinden sich deshalb Gleisfreimeldeanlagen, welche ein vollständiges Durchfahren der Züge (bis zur letzten Achse) signalisieren. So ist bekannt, ob sich aktuell ein Zug vollständig im Bahnhof befindet, bei der Einfahrt dorthin ist oder ein Zug auf dem jeweiligen eingleisigen Abschnitt (und nicht im Bahnhof) ist. Weitere Details folgen bei den Erläuterungen zur Leit- und Sicherungstechnik.

Die Weichen stellen die einzige Möglichkeit zum Gleiswechsel zur Verfügung, dafür befinden sich diese an Bahnhöfen z. B. zur Bedienung der gewünschten Bahnsteige oder an der Strecke. An der Strecke sind Weichen für Überleit- und Abzweigstellen (sowie Anschlussstellen). Überleitstellen ermöglichen den Wechsel auf das parallele Gleis der selben Strecke. Abzweigstellen erlauben das Verlassen der aktuellen Strecke auf eine andere. Ist die Abzweigung örtlich begrenzt (einzelnes Rangiergleis) sowie gering frequentiert, wird ggf. nur eine Anschlussstelle eingerichtet, welche anders abgesichert wird (siehe citePachl2008). Weichen bieten analog zu Kreuzungen im Straßenverkehr nur die Möglichkeit der Gleis-Änderung in bestimmte Richtungen. Die Fahrt ist dabei immer nur von einer Seite/dem Stamm zur Spitze oder umgekehrt möglich (siehe Abbildung 2.1). Üblich sind Einfache Weichen (EW) und Einfache (EKW) und Doppelte (DKW) Kreuzungsweichen. Mit EW wird das Ende bzw. der Anfang eines Gleisabschnitts mit einem durchgehenden Gleis verbunden. EKW und DKW treten bei Kreuzungen von zwei durchgehenden Gleisen auf und erlauben dort einen Wechsel von einem Gleis auf das andere (EKW) und ggf. in die andere Richtung (DKW). Neben dem Aufbau ist auch der Zustand der Netzelemente von Bedeutung, da Abschnitte durch Störungen ggf. eingeschränkt (langsamer, nicht elektrifiziert) oder überhaupt nicht befahren werden können. Die Störungen werden deshalb in Unterabschnitt 2.2.1 gesondert betrachtet. Zum Zustand der Netzelemente gehört auch die aktuell gestellte Fahrstraße. Als Fahrstraße wird der durch Weichen und Signale eingestellte und abgesicherte Weg durch das Netz für einen konkreten Zugverbund bezeichnet.

2.1.2. Fahrzeuge

Das Rollmaterial, welches von den Verkehrs- und Logistikunternehmen betrieben wird, unterscheidet sich stark in seinem Aufbau. Die technischen Details eines Zugverbunds, wie dessen Länge, Masse sowie Beschleunigungs- und Bremsleistungen, sind für die Prognose von Fahrverläufen wichtig. Weiterhin schränkt die Energiequelle der Triebfahrzeuge (Oberleitung oder Diesel) ggf. die Streckennutzung ein.

Zu einem Zugverbund gehören Triebfahrzeug(e) und ggf. Wagen. Insbesondere im Regionalverkehr verkehren auch Züge, welche aus Triebwagen (Triebfahrzeugen mit Fahrgastraum) bestehen. Die Zugverbünde mancher Zugtypen, wie z. B. der ICE-Typen, sind in ihren Zugverbünden mehr oder weniger stark gekoppelt und können während des Betriebs nicht oder nur schwer getrennt werden. So gibt es für solche Verbünde im Regelbetrieb nur die Möglichkeit diese zu vereinigen (oder *verstärken*, vgl. ICE 945/955 Hamm nach Berlin Ostbahnhof, Jahresfahrplan 2014) oder vereinigte Verbünde zu trennen (oder *flügeln*). Vereinigungen bieten die Vorteile der gemeinsamen einmaligen Nutzung von Fahrplantrassen und des etwas geringeren Energieverbrauchs (gemeinsame Aerodynamik). Nachteile liegen in der Anfälligkeit für Störungen, hat einer der Verbundteile Verspätung, so pflanzt sich diese ggf. auf alle Teile der Vereinigung fort. Der Vorgang der Kopplung dauert außerdem, da der anzukoppelnde Zugverbund nur mit sehr geringer Geschwindigkeit in den vom anderen Zugverbund belegten Abschnitt einfahren kann.

Diese Kopplungszeit fällt auch für Kurswagen an. Kurswagen sind ein Konstrukt der Planung, bei dem ein Zugteil zu unterschiedlichen Zeitpunkten seines Umlaufs unterschiedlichen Zugverbünden angehört. Umläufe beschreiben den zeitlichen und räumlichen Verlauf eines Zugteils oder des Personals (Personalumläufe) und werden im Unterabschnitt 2.1.7 erläutert. So wird es den Fahrgästen erlaubt trotz abweichendem Fahrtverlauf des restlichen Zugverbundes im Wagen zu bleiben und die Fahrt in die gewünschte Richtung fortzusetzen (z. B. bei Schlafwagen).

Für die Simulation von realen Umläufen sind nicht nur die og. physikalischen Größen und außergewöhnliche Maßnahmen wie Kopplungen zu berücksichtigen. Störungen an einzelnen Wagen oder dem Triebfahrzeug können weiterhin längere Fahrzeiten oder Aufenthalte notwendig machen. Diese werden daher im Unterabschnitt 2.2.1 für die verschiedenen Aspekte des Bahnverkehrs zusammengeführt.

Um den real möglichen Fahrtverlauf der Züge zu berechnen, wird hier auf deren Verhalten beim Bremsen und Beschleunigen eingegangen. Für die Berechnung der Zugfahrt ist die mögliche Zugkraft der Triebfahrzeuge von Bedeutung, welche oft in Z/v -Diagrammen (Zugkraft/Geschwindigkeit) angegeben wird. Dort lässt sich zu einer Geschwindigkeit die maximal mögliche Zugkraft ablesen. Je nach Situation (vor allem der Strecke) ergeben sich dann unterschiedlich Kräfte, die dieser Zugkraft entgegen wirken. Diese Kräfte sind teilweise geschwindigkeitsabhängig wie der Luftwiderstand oder praktisch geschwindigkeitsunabhängig wie der Rollwiderstand. Der Luftwiderstand verändert sich in Tunneln durch die veränderte Strömungssituation erheblich. Je nach Zustand der Strecke und Anzahl und Art von Weichen verändert

2. Grundlagen

sich außerdem der Rollwiderstand. Je nach Neigung der Strecke wirkt weiterhin die Masse des Zugs mit oder gegen die aktuelle Bewegung. Gegen Veränderungen der Geschwindigkeit wirken neben dem aus dem Stillstand wirkenden Anfahrwiderstand der klassische Beschleunigungswiderstand durch Massenträgheit. Der Anteil rotierender Massen (z. B. Radsätze) wird hier per Massenfaktor hinzugefügt und erhöht die Beschleunigungswiderstände zwischen 6 und 10 Prozent (siehe auch [15] und [32]).

Der Triebfahrzeugführer steuert die Zugkraft üblicherweise in verschiedenen Fahrstufen, welche als Menge von Z/v-Linien und einem Zugkraftkennlinienfeld zu sehen sind (siehe Abbildung 2.2). Dort zu sehen ist der typische Verlauf der Z/v-Linien bei Dauerleistung, welcher später auch bei (Vor-)Berechnungen von FBS (siehe Unterabschnitt 4.2.1) von Bedeutung ist. Durch die spezifischen Leistungskennlinien der Diesellaggregate, welche ggf. zur Stromerzeugung verwendet werden, kann es dabei allerdings zu Abweichungen kommen. Typisch ist allerdings die Zugkraftbegrenzung im unteren Geschwindigkeitsbereich und die negativ exponentielle Abnahme der Zugkraft mit Zunahme der Geschwindigkeit bis zu einer vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit. Die dort angegebene negative Zugkraft gehört zu den regenerativen Bremsen, die gesamte effektive Bremskraft ist natürlich höher. Durch die Wirkungsweise und -grad der regenerativen Bremsen funktioniert die Energierückgewinnung erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit. Für weitere Erläuterungen zu Fahrweisen und Fahrphysik sei auf [17] (aus dem auch die Abbildung 2.2 entnommen ist), [15] und [32] verwiesen.

2.1.3. Personen

Für die Durchführung des Bahnverkehrs verantwortlich ist das Personal in den Fahrzeugen und in den Stellwerken und Betriebszentralen. Die Triebfahrzeugführer sind für die Steuerung der Züge zuständig und haben damit großen Einfluss auf deren Fahrverhalten. Reaktionszeiten und Aufmerksamkeit haben Einfluss auf die Fahrzeiten und Energieverbräuche durch Veränderung von Beschleunigungs- und Bremsverhalten und deren Zeitpunkten. Das weitere Zugpersonal, wie die Zugbegleiter, ist allerdings auch für einen regulären Betriebsablauf von Bedeutung. Mit Fahrtbeginn oder Personalwechsel im Fahrtverlauf muss das Personal rechtzeitig zur Verfügung stehen, um die Fahrt pünktlich beginnen/fortsetzen zu können. Insbesondere an den stark frequentierten Verkehrsknotenpunkten ist die Betriebssteuerung durch erfahrenes Personal durchzuführen. Am Mainzer Hauptbahnhof zeigten sich 2013 durch Personalmangel im Stellwerk erhebliche Einschränkungen (siehe [6]).

Auch nicht zum Personal gehörige Personen haben Einfluss auf den ordnungsgemäßen Ablauf. So haben die Fahrgäste und deren Anzahl direkte Auswirkungen auf die Fahrgastwechselzeiten an Bahnhöfen. Andere Personen können außerdem den Bahnbetrieb durch unerlaubten Aufenthalt auf Bahnanlagen oder sonstige Einflussnahme beeinträchtigen (siehe Unterabschnitt 2.2.1).

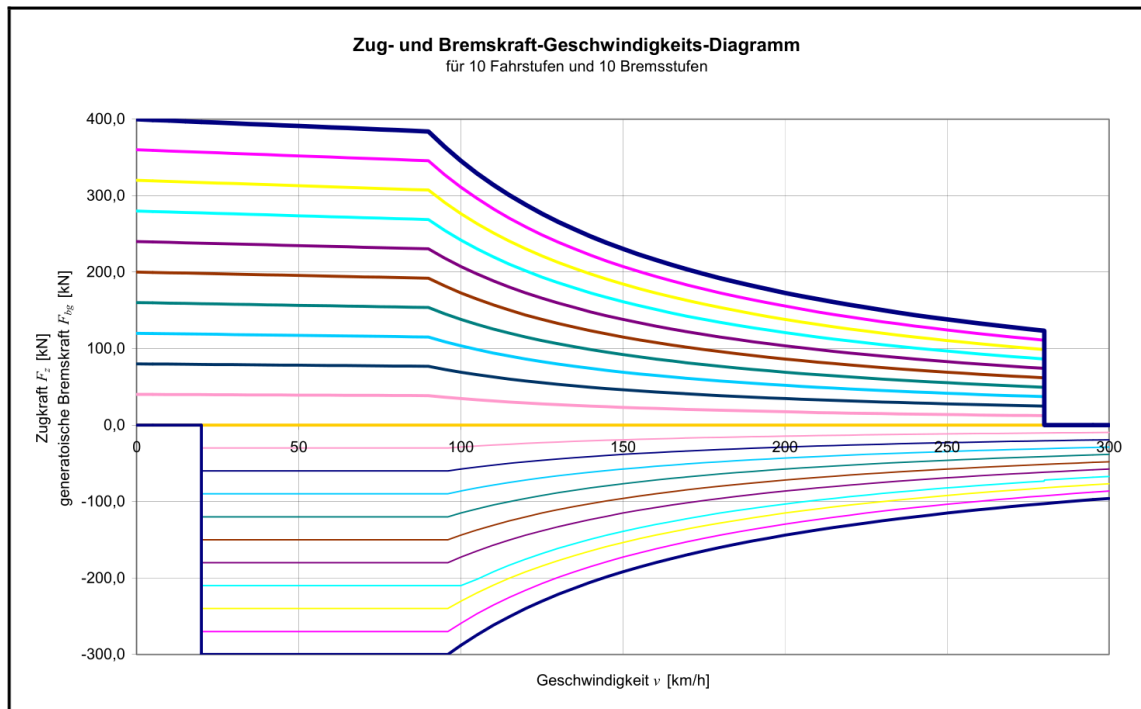


Abbildung 2.2.: Zugkraftkennlinienfeld aus [17]

2.1.4. Leit- und Sicherungstechnik

Die Leit- und Sicherungstechnik koordiniert die Züge im Netz. Sie beeinflusst die mögliche Fahrt eines Zuges und stellt in ihrer grundlegenden Ausprägung durch Signale die Sicherheit des Betriebs sicher. Dazu gehört auch die Kontrolle der Einhaltung von Signal-Stellungen bzw. Höchstgeschwindigkeiten. Da Systeme zur Zugbeeinflussung in weiteren Ausbaustufen auch über die Position der Züge Auskunft geben und die Geschwindigkeit vorgeben/vorschlagen, stellen sie einen wichtigen Faktor bei der Optimierung der Fahrweisen im Projekt PiLoNav dar. Auf die Ausprägungen dieser Systeme wird daher in Unterabschnitt 2.1.5 näher eingegangen.

In diesem Unterabschnitt geht es weiter nur um die grundlegenden Methoden der Sicherung des Verkehrs. Eines der aktuellen Prinzipien der Sicherungstechnik ist das Fahren im Blockabstand (oder auch Raumabstand). Von diesem Prinzip wird nur in Ausnahmen abgewichen (Fahren im Zeit- oder Sichtabstand). Hierbei darf sich in einem Blockabschnitt (Gleisabschnitt, der durch Hauptsignale begrenzt wird) maximal ein Zug befinden. Ist ein Zug in diesem Abschnitt, sind die begrenzenden Hauptsignale auf Halt gestellt und erlauben kein passieren in Richtung des Blocks. Um sicherzustellen, dass ein Zug vor einem Hauptsignal angehalten werden kann, befindet sich üblicherweise 1000m vor einem Hauptsignal ein dazugehöriges Vorsignal. Das Vorsignal zeigt die zu erwartende Hauptsignal-Stellung an. Die 1000m werden

2. Grundlagen

als Regelbremsweg bezeichnet und ergeben sich aus dem unter allen Bedingungen zu garantierenden Bremsweg der Fahrzeuge (160km/h, Haftreibung Rad - Schiene). Ist durch Strecke und Fahrzeug eine schnellere Fahrt gegeben, muss die Geschwindigkeit permanent überwacht werden. Für höhere erlaubte Geschwindigkeiten und zur Verkürzung der Blockabschnitte ist durch manche Signalanlagen auch eine Mehrabschnittssignalisierung möglich. Dabei wird nicht nur der direkt folgende Blockabschnitt angezeigt, sondern eine weitere Vorausschau möglich. Diese Vorsignalisierung gibt es auch für Geschwindigkeitsanzeiger, welche die Höchstgeschwindigkeit auf dem aktuellen Blockabschnitt einschränken können (siehe [23]).

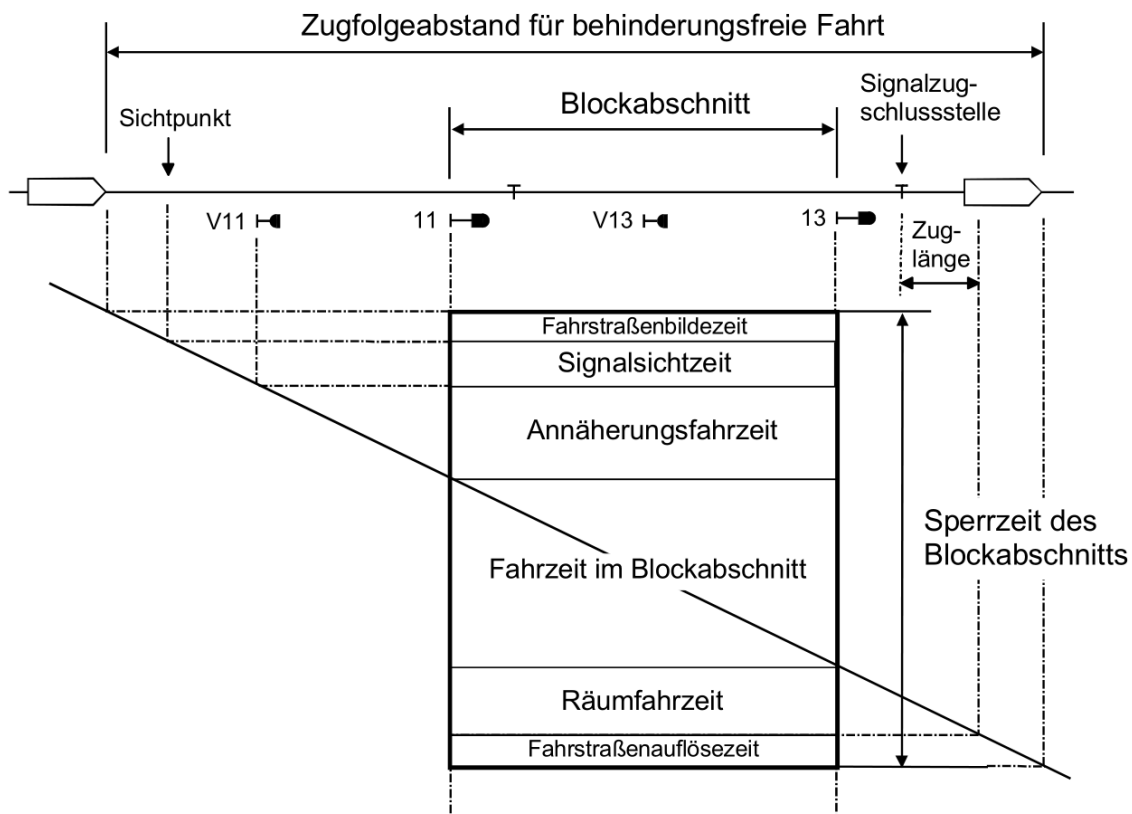


Abbildung 2.3.: Sperrzeit für durchfahrenden Zug aus [23]

Die Belegung eines Blockabschnitts selbst ergibt sich aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Systems nicht einfach zum Zeitpunkt von Ein- und Austritt des Zuges in den Blockabschnitt und ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Vor der Einfahrt in einen Blockabschnitt muss die entsprechende Fahrstraße gebildet sein (*Fahrstraßenbildezeit*), dazu gehören z.B. ggf. Änderungen der Weichenstellungen und sonstige Reaktionszeiten der technischen Einrichtungen. Weiterhin muss dem Triebfahrzeug-

fürher ein ausreichendes Zeitfenster zur Sicht und Reaktion auf die Signalstellung eingeräumt werden (*(Signal-)Sichtzeit*). Es folgt die Zeit, die der Zugverbund vom Vorsignal bis zum Hauptsignal fährt und in der bei Freigabe durch das Vorsignal u.U. nicht mehr auf eine veränderte Hauptsignalstellung reagiert werden kann (*Annäherungsfahrzeit*).

Die eigentliche *Fahrzeit* beschreibt den Ein- und Austritt der Zugspitze im Blockabschnitt. Es folgt mit der Ausfahrt der Zugspitze aus dem Blockabschnitt die Zeit bis zur Überfahrt der Signalzugschlussstelle mit der letzten Achse des Zugverbunds (*Räumfahrzeit*). Nach registriertem Austritt des Zugverbunds aus dem Blockabschnitt folgt mit Auflösung der Fahrstraße wieder eine Pufferzeit für die Reaktionszeiten der technischen Einrichtungen (*Fahrstraßenauflösezeit*).

Die sich ergebenden Sperrzeiten der Blöcke bei Benutzung durch Züge ergeben beim Verlauf über mehrere Blockabschnitte die sogenannte Sperrzeitentreppe, da die Zeiten sich treppenförmig im Zeit-Weg-Diagramm abzeichnen (siehe Abbildung 2.4). Die dort eingezeichneten Zeit-Weg-Linien wurden mit den jeweiligen Sperrzeiten versehen. Zu sehen ist ein Zug 2 der dem Zug 1 in höherer Geschwindigkeit folgt. Aus der Geschwindigkeit beider Züge ergibt sich auf der im Spurplan zu erkennenden eingleisigen Strecke ein zeitlicher Mindestabstand, wenn Zug 2 mit dieser Geschwindigkeit weiterfahren soll. Andernfalls würden die Sperrzeiten ineinander übergehen. Die sich aus den Fahrtverläufen der verschiedenen Züge ergebenden zeitlichen Abstände werden als Mindestzugfolgezeit bezeichnet. Bei Tausch der beiden Geschwindigkeiten würde sich als Mindestzugfolgezeit die eigentliche Sperrzeit von Zug 1 ergeben, da beide Züge sich in diesem Fall voneinander entfernen. Für kreuzende Züge auf einer eingleisigen Strecke ist die Mindestzugfolgezeit die Zeit von Beginn der Sperrzeit des ersten Zuges zu Beginn des eingleisigen Streckenabschnitts bis zum Ende der Sperrzeit am Ende des eingleisigen Streckenabschnitts.

Die Sperrzeiten-Darstellung dient der grafischen Erstellung und Visualisierung von Fahrplänen, da Konflikte (siehe Unterabschnitt 2.2.2) in der Blockbelegung als Schnitt der Sperrzeiten sichtbar werden. Durch die Abbildung wird außerdem klar, dass größere Blockabschnitte für eine geringere Kapazität der Strecke sorgen. Die Sperrzeiten werden zunehmend groß und eine Annäherung der Zeit-Weg-Linien ohne Überschneidung der Treppen wird schwieriger. Mit Verkleinerung der Blockgröße nähert sich die Sperrzeiten-Treppe eines Zuges dem parallel-verschobenen Verlauf seiner Zeit-Weg-Linie. Deshalb werden verschiedene Ansätze zur Verkürzung der Blockgrößen oder der (Vor-)Signalabstände angewandt (z. B. Signalisierung im Halbbregelabstand, siehe [23]). Für die Überwachung und Steuerung der Leit- und Sicherungstechnik sind die Stellwerke und Betriebszentralen zuständig. Aus den Stellwerken werden die Signal- und Weichen-Anlagen von Fahrdienstleitern gesteuert. Für fernsteuerbare Stellwerke kann die Arbeit des Fahrdienstleiters auch in der zuständigen Betriebszentrale stattfinden. In Betriebszentralen wird der Bahnverkehr über mehrere Stellwerke hinweg geplant und gesteuert und Disponenten (oder Zuglenker) sind für den übergreifenden Betrieb-

2. Grundlagen

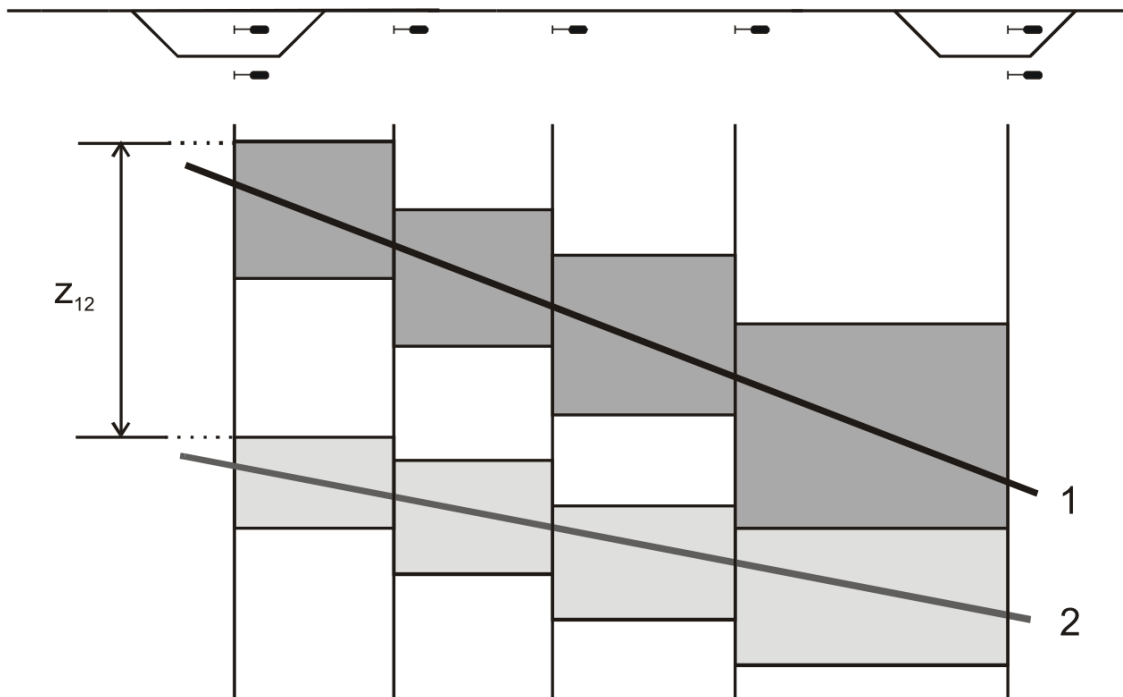


Abbildung 2.4.: Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit aus [16]

sablauf (Steuerbezirke) zuständig. Die Übersicht über den Zuständigkeitsbereich findet über einen Streckenspiegel (wie Spurplan) und Zeit-Weg-Linien statt. In der Netzleitzentrale wird der Bahnverkehr überregional gesteuert. So können Verkehre, welche die Bereiche mehrerer Betriebszentralen durchqueren, geplant und überwacht werden (siehe [16]). Für weitere Erläuterungen, wie z. B. auch zum Flankenschutz, der Teil der Sicherheit einer Fahrstraße auch über Gleiswechsel hinaus ist, sei auch auf [19] verwiesen.

2.1.5. Zugbeeinflussungssysteme

Dichte Zugfolgen bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten lassen sich nur durch die Einrichtung von technischen Sicherungen gefahrlos erreichen. Zugbeeinflussungssysteme stellen dabei unter anderen die Einhaltung der Fahrbefehle (Halt und ggf. Geschwindigkeit) sicher. Sie werden deshalb durch die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) mit § 15 auf vielen Strecken und mit § 28 an den dort verkehrenden Fahrzeugen vorgeschrieben [3]. Auf Mittel der Zugbeeinflussung wird daher nur auf wenigen (wenig befahrenen) Strecken und Zügen verzichtet. Es existieren verschiedene Arten der Zugbeeinflussung mit unterschiedlichen Möglichkeiten. Fällt die gesamte Zugbeeinflussung aus, sind laut EBO § 40 nur 50km/h erlaubt. Die Höchstgeschwindigkeit für Strecken ohne Zugbeeinflussung liegt bei 100km/h (siehe auch [17]).

Punktförmige Zugbeeinflussung

Die punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) findet an ortsfesten Punkten im Netz statt. Ihre Aufgabe ist in erster Linie die Überwachung der Beachtung von (Vor- und) Hauptsignalen. Es existieren unterschiedliche Arten der PZB, welche auf verschiedene Weise mit den Zügen und ggf. Triebfahrzeugführern interagieren. Bei den einfachsten Systemen wird nur nach dem Überfahren eines Haltesignals ein Bremsvorgang am Zug eingeleitet (Fahrsperr). Die Systeme kommen vorrangig im städtischen Nahverkehr zum Einsatz. Die nächste Ausbaustufe übermittelt die Vorsignalisierung und erfordert eine Reaktion (vermindern der Geschwindigkeit, Bestätigung der Kenntnisnahme durch „Wachsamkeitstaste“). An einer auf der Strecke folgenden ortsfesten Einrichtung wird die Reduktion/Einhaltung der Geschwindigkeit überprüft (oder ggf. kontinuierlich durch das Fahrzeug auf dem Weg dorthin) und bei Nichtbeachtung gebremst. Dieses Verfahren hat den Vorteil einer geringeren Geschwindigkeit bis zum Hauptsignal und eines somit verkürzten Bremswegs. Nachteile ergeben sich aus der ggf. unnötigen Reduktion der Geschwindigkeit wenn die Signalstellung auf Weiterfahrt wechselt. Hier wurden Möglichkeiten geschaffen, die fahrzeugseitige Überwachung der Geschwindigkeit zu überschreiben. Das Verfahren verringert allerdings (bei Fehlern oder Missbrauch) den Vorteil des kürzeren Bremswegs, wenn bis zum nächsten Kontrollpunkt tatsächlich immer noch ein Halt angeordnet wird. Bei Missachtung der geforderten Geschwindigkeit am zweiten Kontrollpunkt wird eine Zwangsbremmung ausgeführt. Wird die Geschwindigkeit beachtet, wiederholt sich ggf. das Vorgehen zum dritten Kontrollpunkt, welcher als Fahrsperr funktioniert (siehe [23]).

Die Höchstgeschwindigkeit bei ausschließlicher Verwendung von PZB liegt in Deutschland bei 160km/h und damit der Geschwindigkeit, bei der in jedem Fall der Regelbremsweg von 1000m (und damit dem Vorsignalabstand) einzuhalten sein muss.

Linienförmige Zugbeeinflussung

Bei der linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB) wird die Geschwindigkeit durch streckenseitige Einrichtungen vorgeschrieben und kontinuierlich durch die Fahrzeuge überwacht. Die Einrichtung findet in Deutschland üblicherweise durch paarige Linienleiter im Gleis statt. Die regelmäßige Kreuzung der Leiter kann das Fahrzeug feststellen und sich damit verorten. Durch die permanente Überwachung der Geschwindigkeit in Kombination mit regelmäßiger Ortung können kürzere Blockabschnitte eingeführt werden. LZB-Blockabschnitte werden durch fahrzeugseitige Signalisierung „begrenzt“ und haben ggf. kein Äquivalent an der Strecke außer einer Signaltafel. Die streckenseitigen Signale haben beim Fahren mit LZB-Führung eine geringere Priorität (bzw. sind ohne Anzeige), da diese nur für den gesamten Blockabschnitt signalisieren können und noch für einen Betrieb ohne LZB vorhanden sind. Diese Blockabschnitte dienen nur noch als Rückfallebene und werden deshalb teilweise deutlich verlängert (mit dann deutlich verminderter Kapazität).

Nun gilt die Belegung der LZB-Blöcke (das gilt auch für nicht LZB-geführte Züge) als

2. Grundlagen

Blockbelegung für nachfolgende LZB-geführte Züge. Diese berechnen anhand der Belegung und Geschwindigkeitsbeschränkung der folgenden LZB-Blöcke (vom Stellwerk) sowieso der aktuellen Geschwindigkeit ihre Sollgeschwindigkeit für diesen und folgenden LZB-Blöcke anhand einer angegebenen Bremskurve. Daraus ergibt sich quasi eine Mischung aus Fahren im Brems- und Blockabstand mit einer Mehrabschnittsbremung und -signalisierung (siehe [23]).

Die Anzeige im LZB-geführten Triebfahrzeug beinhaltet die drei Größen Sollgeschwindigkeit, Zielgeschwindigkeit und Zielentfernung. Die Sollgeschwindigkeit ist die aktuelle Höchstgeschwindigkeit, welche entweder durch das Stellwerk oder durch die Bremskurve vorgegeben ist. Diese Geschwindigkeit wird durch die fahrzeugseitige LZB kontrolliert und eine Überschreitung führt zu einer Zwangsbremung. Zielgeschwindigkeit und -entfernung zeigen z. B. eine sich anbahnende Verringerung der Streckenhöchstgeschwindigkeit oder einen belegten Blockabschnitt an. Die Angabe der Entfernung dient dem Fahrzeugführer zur Einschätzung der optimalen Fahrweise, wenn etwa eine weitere Beschleunigung nicht sinnvoll aber noch möglich wäre.¹ Mit der Einführung von LZB-geführten Fahrzeugen werden auch Systeme zur automatischen Zugsteuerung möglich, welche z. B. die schrittweise Bremsung anhand der Sollgeschwindigkeit übernehmen.

2.1.6. Entwicklungen / ETCS

Ziel der aktuellen Entwicklungen ist eine Steigerung der Kapazität der Strecken und eine Reduktion oder Vereinfachung der nötigen streckenseitigen Einrichtungen, da diese hohe Kosten verursachen können. Die Einführung des Bahnfunks erlaubt z. B. den kontinuierlichen Austausch zahlreicher Informationen, welche den Einsatz von Linienleitern überflüssig machen kann. Mit dem *European Train Control System* (ETCS) wird außerdem eine Vereinheitlichung der Zugbeeinflussung innerhalb der EU-Mitgliedsländer angestrebt. Die Einführung und der Ausbau mit ETCS an Strecken und Fahrzeugen ist dabei in verschiedene Stufen aufgeteilt. Allen Stufen gemein ist die Ausrüstung der Fahrzeuge mittels *Euro-Cab*, der vereinheitlichten fahrzeugseitigen Einrichtung, welche wenigstens in der Migrationsphase auch Schnittstellen für nationale Systeme, in denen der Zug verkehrt, zur Verfügung stellen soll (siehe [9]).

In der Stufe 1 werden hauptsächlich die unterschiedlichen Formen der PZB harmonisiert und ggf. aufgewertet. Eine linienförmige Informationsübertragung durch Kabelantennen (*Euro-Loop*) ist möglich, jedoch optional und in ihrer Länge begrenzt. Die Ortung findet streckenseitig mittels *Euro-Balise* statt, welche neben der Position auch weitere Informationen bidirektional mit dem Fahrzeug austauschen können. Daher kann auch bei einer ausschließlich punktförmigen Informationsübertragung prinzipiell das Fahrzeug teilweise geführt werden. Da die Signalisierung im Führerraum jedoch nicht Teil der Stufe 1 ist, wird auf die ortsfesten Signalanlagen meist nicht verzichtet.

¹Beispiele des LZB-Betriebs und der Signalisierung im Führerstand sind auf <http://www.grahnert.de/fernbahn/lzb/lzb.htm> zu sehen (letzter Abruf 04.05.2014).

In Stufe 2 wird die streckenseitige Informationsübertragung durch Bahnfunk (*Euro-Radio* = GSM-R) ersetzt. Der Einsatz der Euro-Balisen dient nur noch zu punktgenauen Ortung (zwischen den Balisen berechnet der Zug seine Position über die Radumdrehungen) bzw. als Rückfallebene. Teil dieser Stufe ist auch die Führerraum-Signalisierung. Damit ist die Funktionalität in etwa Äquivalent zur LZB. Auf Linienleiter und streckenseitige Signalisierung kann verzichtet werden (bzw. diese wird überschrieben).

Mit Stufe 3 wird das Fahren im Blockabstand weitestgehend verlassen. Die Balisen dienen weiterhin der Korrektur der Position. Durch die kontinuierliche Überwachung der Position und Vollständigkeit entfällt allerdings die Notwendigkeit von Gleisfreimeldeanlagen und der damit impliziten Blockbildung. Durch Achszähler (oder Gleisstromkreise) wurde sichergestellt, dass der Zug einen Block komplett verlassen hat. Die Vollständigkeitsüberprüfung soll nun fahrzeugseitig sicherstellen, dass ein Zug komplett ist. In Kombination mit der Position ergeben sich sicher Anfang und Ende eines Zugverbunds. Mit Stufe 3 wird daher prinzipiell ein Fahren im (absoluten oder relativen) Bremsabstand möglich. Wird auf die Rückfallebene (Gleisfreimeldeanlagen, Signalanlagen) verzichtet, ist dort jedoch kein Betrieb von Fahrzeugen möglich, die diese Stufe nicht unterstützen (siehe auch [23] und [19]).

Als Ersatz oder Ergänzung für die Ortsbestimmung durch Euro-Balisen kann auch z. B. differentielles GPS verwendet werden, um eine kontinuierliche Bestimmung der Position zu ermöglichen. Die Sensoren werden dann als virtuelle Basisen eingebunden, ohne weitere Änderungen am System notwendig zu machen.

2.1.7. Fahrplan

Der Fahrplan beschreibt den zeitlichen Verlauf der Streckennutzung und wird jährlich von den Netzbetreibern im Auftrag der Verkehrsunternehmen erstellt. Dabei sollen Anforderungen der Verkehrsunternehmen an Anschlüsse und Taktungen umgesetzt werden. Der erstellte Jahresfahrplan enthält auch geplante Baumaßnahmen, welche Einfluss auf das Schienennetz nehmen. Weiterhin ist er konfliktfrei, d.h. er enthält keine Konflikte bei der Nutzung von Ressourcen wie Bahnsteig- oder freien Streckenabschnitten (siehe Unterabschnitt 2.2.2). Wenn im Verlauf des Jahres das Netz oder die Akteure Abweichungen notwendig machen, wird der Jahresfahrplan ggf. von Bau- oder anderen kurzfristigen Fahrplänen ersetzt.

Für die Erstellung des Fahrplans sind auch die Umlaufplanungen der Verkehrsunternehmen von Bedeutung. Diese beschreiben den vollständigen Weg eines Fahrzeugs (Triebfahrzeug und/oder Wagen) im Netz. Während eine Fahrt im Fahrplan z. B. von Start- zu Zielbahnhof geht, umfassen Umläufe alle Wege zwischen und außerhalb der eigentlichen (Personen- und Güterverkehr-) Fahrten meist über einen Verkehrstag (bzw. regelmäßige Verkehrstage). Ein Verkehrstag dient im Fahrplan als Referenz auf echte Kalendertage. Dabei kann ggf. mit Zeitangaben größer als 24 Uhr der eigentliche Kalendertag wechseln, der Verkehrstag dieser Fahrt bleibt der selbe. Dies erleichtert z. B. die Möglichkeit Fahrten, welche über Mitternacht gehen, zu beschreiben. Erst mit Berücksichtigung des gesamten Umlaufs können realistische Fahrpläne erstellt

2. Grundlagen

und Auswirkungen von Planänderungen prognostiziert werden. Planänderungen verändern nicht nur die zeitliche Nutzung von Streckenabschnitten, sondern können auch die Verfügbarkeit des betroffenen Fahrzeugs für die Folgefahrten beeinträchtigen. Die Betrachtung gilt äquivalent für das Personal, welches mit den Zügen unterwegs ist (Triebfahrzeugführer, Zugbegleiter).

Jeder Fahr- oder Umlaufplan besteht mindestens aus der Sequenz an zu befahrenden Gleisabschnitten (oder den begrenzenden Betriebsstellen) mit Angaben zur geplanten Ankunft und/oder Abfahrt an diesem Abschnitt/Punkt. Bei geplanten Halten in Bahnhöfen (zum Fahrgastwechsel) werden Mindesthaltezeiten angegeben. Bei Abweichungen vom Betrieb können diese nicht unterschritten aber ggf. ausgereizt und so die Verspätungen reduziert werden. Ergänzend finden sich für den Triebfahrzeugführer meist Vorgaben zur (tagesaktuellen) Höchstgeschwindigkeit (Buchfahrplan). Dieser Fahrplan wird in der Regel elektronisch in Systemen wie *EBuLa* (Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen) zur Verfügung gestellt. In Kombination mit den Daten der Zugbeeinflussung (aktuelle Position und Geschwindigkeit) und der Fahrplansituation lassen sich dann durch Komponenten Vorschläge zur energiesparenden Fahrweise realisiert werden, wie z. B. ein günstiger Zeitpunkt für die Abschaltung der Zugkraft (siehe [17]).

Die Qualität eines Fahrplans ist insbesondere durch die Einplanung von Zeitreserven für die Stabilität beeinflusst. Mit der Einplanung von ausreichenden Fahrzeitreserven können Abweichungen vom geplanten Betriebsablauf kompensiert werden, da nicht jeder folgende Verkehr sofort beeinflusst wird. Größere Abweichungen können so außerdem durch die schrittweise Kompensation der individuellen Verlegung der folgenden Züge aufgefangen werden, daher kann der Betrieb leichter wieder stabilisiert werden. Weiterhin dienen Fahrzeitreserven im planmäßigen Betrieb der energie-effizienteren Fahrweise. Die Triebfahrzeugführer müssen den Zug nicht „spitz“ fahren (Verlauf des Geschwindigkeits-Weg-Diagramm), sondern können etwa vor dem nächsten geplanten Halt den Zug rollen lassen, man spricht dann vom Fahren mit bzw. ohne (Fahrzeit-)Reserve. Durch größere Fahrzeitreserven vergrößern sich selbstverständlich auch die Fahr- oder Haltezeiten, da eine vor-fahrplanmäßige Abfahrt nicht zulässig ist. Die Fahrzeit ist allerdings ein wichtiges Kriterium für die Entscheidung für oder gegen ein Verkehrsmittel. Weiterhin verkleinert sich die Kapazität der jeweiligen Strecke, da mit größeren Reserven die Zahl der möglichen Fahrten abnimmt. Daher wird die Fahrzeitreserve je nach Strecke (ggf. Mängel oder Baumaßnahmen) und Zug bzw. Triebfahrzeug (unterschiedliche Fahrdynamik) abgestimmt. Übliche Werte liegen zwischen 3 und 7 Prozent (siehe [16] und [17]), können ggf. aber auch größer ausfallen.

Für den Fahrgast und die Fahrgastinformation wichtig sind die Anschlussplanungen. Diese beinhalten die Beziehungen von Zubringer- und Abbringerfahrten und sichern so das Umsteigen in bestimmte Richtungen ab. Hat der Zubringer Verspätung, gibt es maximale Wartezeiten die der Abbringer warten kann, um die Fahrgäste der Zubringer-

fahrt noch umsteigen zu lassen. Hierfür sind Standard-Zeiten festgelegt, welche zwischen Zügen gleicher und unterschiedlicher Kategorien (RE, IC, usw.) gelten. Abweichend davon kann je nach Bedarf, der ggf. über die Zugbegleiter festgestellt wird, von den Zentralen eine andere Wartezeit festgelegt werden.

Die Planung maximaler Wartezeiten ist auch für die Fahrgastinformation von Bedeutung, da mittlerweile in der elektronischen Fahrplanauskunft auch Informationen zur Verspätungssituation übermittelt werden. So können Umsteigemöglichkeiten bei der Verbindungssuche ggf. nicht oder trotzdem berücksichtigt werden. Grundlage zur Sicherung von Anschlüssen ist auch die Bahnhofsfahrordnung. In dieser ist die Benutzung der Gleise und deren Abschnitte innerhalb eines Bahnhofs geregelt. Weit voneinander entfernte oder wegen Bauarbeiten oder anderen baulichen Besonderheiten schwierig zu erreichende Gleise sorgen für ggf. längere Umsteigezeiten. Die Gleisinformation (insbesondere bei Abweichungen von der Planung) ist selbstverständlich auch für den Fahrgast von Bedeutung.

2.2. Abweichungen vom geplanten Betrieb

Nachdem im vorherigen Abschnitt der planmäßige Betrieb und dessen Elemente vorgestellt wurden, geht es in diesem Abschnitt um die möglichen Abweichungen vom Fahrplan. Dazu werden die Ursachen und mögliche Lösungen dafür erläutert. Da der Bahnbetrieb durch einen Fahrplan gesteuert ist, wird bei größeren Abweichungen vom Betrieb ggf. der Fahrplan für einzelne Züge verändert. Ziel ist es, den planmäßigen Betrieb so effizient wie möglich wieder aufnehmen zu können und dabei Verspätungen und Energieverbrauch der einzelnen Züge und des gesamten Abschnitts zu minimieren. Dadurch ergibt sich ein Regelkreis, bei dem eine größere Abweichung für einen neuen Fahrplan sorgt, der den aktuellen Fahrplan ersetzt.

2.2.1. Störungen

Störungen im Umlauf eines Zuges haben unterschiedliche Ursachen. Grundsätzlich können diese Störungen vom Netz (Strecke, Betriebsstellen), vom Fahrzeug, von Personen (Personal, Fahrgäste), von anderen Zügen oder von Einflüssen von außen begründet sein. Die resultierenden Verspätungen werden unterschiedlich klassifiziert. *Folgeverspätungen* entstehen, wenn sich die Verspätungssituation anderer Züge auf den betrachteten Zug auswirken. *Ur- oder Unterwegsverspätungen* sind durch die meisten der folgend genannten Störungen entstanden und beschreiben die ursächliche Entstehung einer neuen Verspätung. Weiterhin können z. B. Verspätungen von Zügen von einem in einen anderen Zuständigkeitsbereich übernommen werden, da sich diese zwischen den Bereichen bewegen. Hier wird von *Einbruchs-* bzw. *Ausbruchsverspätungen* gesprochen, da diese schon bestanden haben. In Tabelle 2.1 ist ein Überblick über die Störungen, welche zu Verspätungen führen können und ihre Auswirkungen dargestellt.

2. Grundlagen

Weichenstörungen beschreiben die eingeschränkte Funktionalität der Weichen, diese kann z. B. dadurch begründet sein, dass die Stellung der Weiche nicht mehr korrekt gemeldet wird. Witterungsbedingt kommt es bei Weichen ohne Heizung jedoch auch zum Festfrieren, sodass die Veränderung der Weichenstellung verhindert ist. Wenn die Funktionalität einer Weiche nicht gewährleistet ist, kann die Einstellung der Fahrwege nicht mehr geschehen und der betroffene Streckenabschnitt wird gesperrt.

Oberleitungsstörungen können z. B. durch umgestürzte Bäume, Sabotage („Hakenkralen“) oder Diebstahl der Kabel auftreten. Durch die hohe Fahrspannung von 15kV ist ein sicherer Betrieb auch von nicht elektrifizierten Fahrzeugen bis zur Beseitigung der Störung nicht gewährleistet und die Strecke wird gesperrt. Ist der bauliche Zustand der Strecke etwa durch ihr Alter bzw. Belastung durch Züge nur mangelhaft, kann die Höchstgeschwindigkeit eines Streckenabschnitts herabgesetzt werden (*Langsamfahrstelle*). Dies gilt auch für die Umgebung von *Baumaßnahmen* zur Sicherung der Baustelle oder bei temporär unklarem Streckenzustand (bei Orkan und der Gefahr von Bäumen auf der Strecke). Bau- oder Räumungsmaßnahmen an einer Strecke selbst führen selbstverständlich zu deren Sperrung.

Durch die *Witterung* kann nicht nur die Funktionalität von Weichen eingeschränkt sein, sondern auch der Reibwert des Rad-Schiene-Systems verringert werden. Dadurch werden die möglichen Kräfte zur Beschleunigung der Züge eingeschränkt und die Fahrzeit verlängert sich. Einschränkungen der *Leit- und Sicherungssysteme* haben je nach Ausprägung unterschiedlich starke Folgen. Diese gehen von eingeschränkter Geschwindigkeit (z. B. bei Ausfall der Zugbeeinflussung) bis zur einzelnen Freigabe jeder Weiterfahrt durch den Fahrdienstleiter. Die *Verspätung anderer Züge* im selben Bereich haben unterschiedliche Auswirkungen. Diese gehen von Anschlusskonflikten mit verlängerten Haltezeiten zur Garantie des Fahrgastwechsels bis zu Belegungskonflikten mit verlängerten Fahr- oder Haltezeiten und werden in Unterabschnitt 2.2.2 näher erläutert.

Technische Störungen an *Antriebs- oder Bremssystemen* der Fahrzeuge können zum Ausfall der Fahrzeuge führen oder erlauben einen weiteren Betrieb mit verringerter Geschwindigkeit und damit verlängerten Fahrzeiten. Als *Heißläufer* werden Wagen mit unerlaubt heißen Radlagern (durch Lagerschaden) genannt. Auch kann es zum Bruch der *Feder* im Drehgestell kommen. Bei beiden Problemen müssen die Wagen aus Gründen der Betriebssicherheit (z. B. Entgleisung) aus dem Verkehr gezogen werden (siehe [18]). *Türstörungen* verursachen in der Regel höhere Fahrgastwechselzeiten, da weniger Türen zur Verfügung stehen bzw. die Fahrgäste von dieser zu einer anderen Tür laufen müssen. Beeinträchtigungen in den *Sicherungssystemen* der Fahrzeuge können ebenso wie auf der Strecke die Verringerung der Geschwindigkeit erzwingen. Ist eine kontinuierliche Überwachung der Geschwindigkeit nicht möglich, beschränkt sich die Geschwindigkeit bspw. auf 160km/h.

Ist das *Personal verspätet* oder überhaupt nicht verfügbar, so verlängert sich ggf. die Haltezeit bis das geplante Personal oder Ersatz eintrifft. Bei Beeinträchtigungen der

2.2. Abweichungen vom geplanten Betrieb

Reaktionszeit des Triebfahrzeugführers verlängert sich ggf. die Fahrzeit, da dieser nicht oder verspätet die passenden Fahrstufen einstellt. Zu Veranstaltungen oder im Berufsverkehr ist außerdem mit *erhöhtem Fahrgastaufkommen* zu rechnen. Mit hoher Auslastung der Bahnsteige und Fahrzeuge ist die nötige Zeit für Ein- und Ausstieg (Fahrgastwechselzeit) durch gegenseitige Behinderung erhöht. Außerdem kommt es dann insbesondere im Nahverkehr vor, dass Türen nicht beim ersten Versuch erfolgreich geschlossen werden können. Ungeplante äußere Einflüsse umfassen die *Polizei- und Feuerwehreinsätze*, welche auch bei Personen im Gleis notwendig sind. Je nach Art des Einsatzes muss daher die Strecke gesperrt werden, der Zug länger im Bahnhof verbleiben oder komplett ausfallen. Die Folgen sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Quelle	Störung	Folge
Netz	Weichenstörung	Streckensperr.
	Oberleitungsstörung	Streckensperr.
	baul. Zustand/Maßnahmen	Fahrzeit / Streckensperr.
	Witterung	Fahrzeit
	Leit-/Sicherungssystem	Fahrzeit / Haltezeit
Fahrzeug	verspätete andere Züge	Fahrzeit / Haltezeit
	Federbruch/Heißläufer	Ausfall
	Antriebsstörung	Fahrzeit / Ausfall
	Bremsstörung	Fahrzeit / Ausfall
	Türstörung	Haltezeit
Personen	Sicherungssystem	Fahrzeit
	verspät./fehlendes Personal	Haltezeit
	Reaktionszeit des Fahrers	Fahrzeit
	erhöhtes Fahrgastaufk.	Haltezeit
	Einsatz (Polizei/Feuerwehr)	Haltezeit / Streckensperr. / Ausfall

Tabelle 2.1.: Störungen: Ursache - Wirkung (basierend auf [28] und [1])

2.2.2. Konflikte

Die in dieser Arbeit betrachteten Konflikte im Bahnverkehr sind Fahrplan- und Belegungskonflikte. Fahrplankonflikte beschreiben einfach die Abweichung der tatsächlichen Fahrten vom Fahrplan und können ggf. durch Fahrzeitreserven kompensiert werden. Ungünstige Fahrplankonflikte verursachen Belegungskonflikte, welche durch den zeitgleichen Anspruch zweier Züge auf einen Blockabschnitt entstehen. Blockabschnitte sind durch Sicherungsanlagen getrennte Abschnitte des Streckennetzes, welche Sicherheitsabstände garantieren. Ein Konflikt tritt im Speziellen auch dann auf, wenn ein Zug laut Plan auf ein bestimmtes Gleis im Bahnhof einfahren soll, der vorhergehende Zug allerdings dieses noch nicht verlassen hat. Die Entstehung solcher

2. Grundlagen

Streckensperrungen	Züge können diesen Streckenabschnitt nicht befahren und müssen warten oder auf andere Strecken ausweichen.
Ausfall v. Zug/Wagen	Der betroffene Zug kann in seinem jetzigen Zustand nicht weiterfahren (ggf. Austausch Triebfahrzeug/Wagen).
Fahrzeit	Die Fahrzeit auf einem Streckenabschnitt verlängert sich (spontan oder für alle).
Haltezeit	Die Haltezeit am Bahnhof verlängert sich oder es muss auf freier Strecke gewartet werden.

Tabelle 2.2.: Die möglichen Folgen von Störungen

Konflikte durch Verspätungen ist im vorherigen Unterabschnitt erläutert, bei einem planmäßigen Betriebsablauf sollten keine Konflikte auftreten. Die Erkennung von bevorstehenden Belegungskonflikten kann z.B. optisch anhand der prognostizierten Zeit-Weg-Linien stattfinden. Daher findet an den Arbeitsplätzen der Disponenten oder Fahrdienstleiter häufig eine Zeit-Weg-Linien-Darstellung mit Vergangenheit (1/3) und Zukunft (2/3) statt (siehe [16]). Überlappen sich die prognostizierten Sperrzeiten, wird der Konflikt ggf. automatisiert angezeigt und muss gelöst werden (siehe Abbildung 2.5).

Weiter existieren auch Anschlusskonflikte, welche durch den Verlust bzw. die Gefährdung von Anschlussbeziehungen entstehen. Den Fahrgästen wurde hier ein Umstieg zwischen zwei Zügen zugesichert, der aufgrund der Verspätung der Zubringerfahrt nicht einfach gehalten werden kann. Die Erkennung findet hier z. B. mittels Anschlussgrafik statt, welche analog zur Darstellung der Zeit-Weg-Linien (Vergangenheit und Zukunft) die An- und Abfahrtzeiten der Züge an einem Bahnhof darstellt. Die geplanten Anschlüsse sind Verbindungen zwischen Ankunftszeiten der Zubringer und Abfahrtzeiten der Abbringer. Liegt die Abfahrt vor der Ankunft bzw. nicht die benötigte Umsteigezeit dazwischen, ist dies durch die Verbindung beider Fahrten zu erkennen. Umlaufkonflikte beschreiben die fehlende oder verspätete Verfügbarkeit von Fahrzeugen oder Personal zum Antritt einer (Nicht-Betriebs-)Fahrt durch Verspätung oder Ausfall ihrer vorherigen Fahrt. Die Erkennung von Umlaufkonflikten ist für eine weitere Planung des Betriebsablaufs von Bedeutung, da Verspätungen und technische Probleme nicht mit dem Ende einer Fahrt „verschwinden“. Prinzipiell können diese wie Anschlusskonflikte betrachtet werden, nur dass statt dem Zugwechsel von Fahrgästen der Fahrtwechsel von Betriebs-Ressourcen stattfinden soll. Daher ist die Erkennung solcher Konflikte ähnlich, die möglichen Lösungen unterscheiden sich jedoch.

2.2.3. Konfliktlösungen

Zur Lösung der genannten Konflikte werden verschiedene Strategien angewendet. Die „einfachste“ Strategie der Konfliktlösung besteht in der Befolgung der Signalstellungen

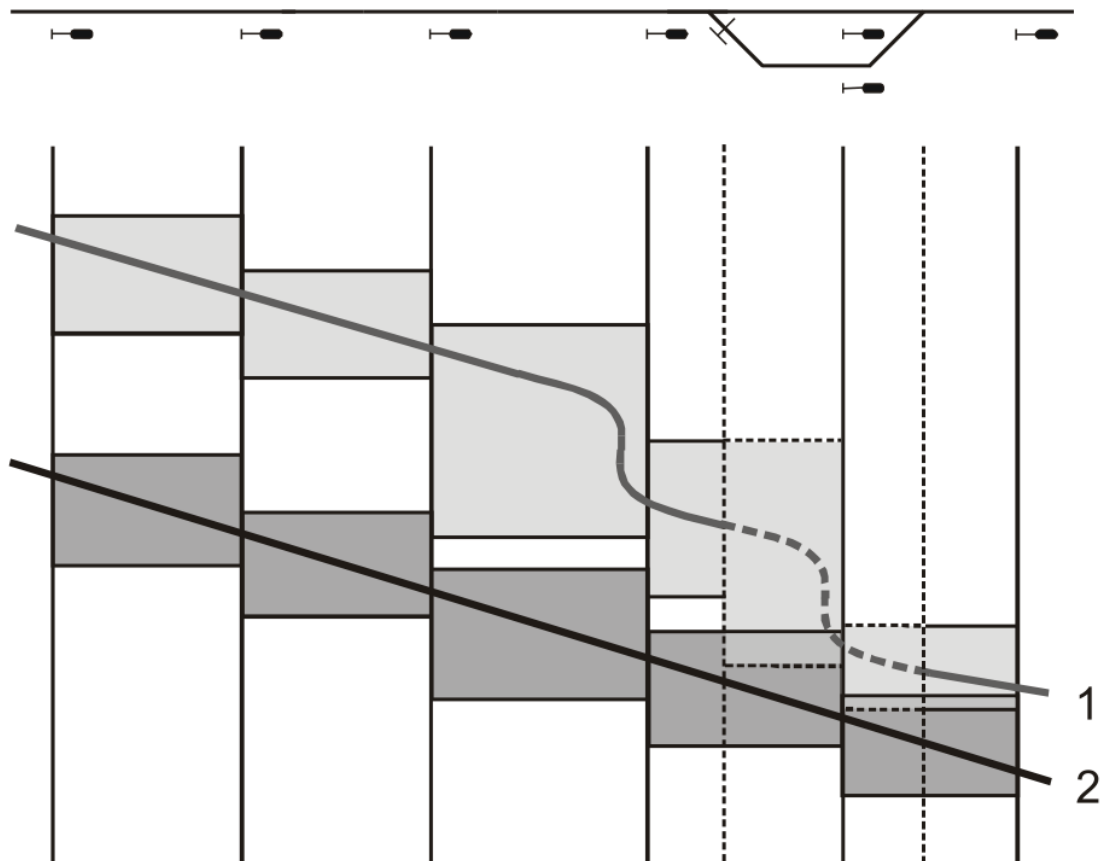


Abbildung 2.5.: Konflikt nach Bahnhof aus [16]

mit bzw. ohne vorausschauendes Fahren. D.h. der folgende Zug, welcher durch den Vorausfahrenden (oder Kreuzenden) behindert wird, wird ggf. bis zum völligen Stillstand vor dem folgenden Hauptsignal gebremst. Verlangsamt der Triebfahrzeugführer vorausschauend die Geschwindigkeit, um ohne Halt das wieder auf Fahrt stehende Signal passieren zu können, wird von *Verbiegen* (oder auch Stutzen) gesprochen. Der Begriff beschreibt den grafischen Verlauf der Zeit-Weg-Linie des betroffenen Zuges. Da sich dessen Geschwindigkeit ändert, „verbiegt“ sich die Linie im Diagramm. Weitere Lösung für einen Belegungskonflikt im Bahnhof ist der Gleiswechsel, hierbei wird entgegen dem Fahrplan ein anderes freies Gleis im Bahnhof angefahren. Dabei ist zu beachten, dass sich Fahrgastwechselzeiten erhöhen können und der Fahrweg zu dem anderen Gleis frei sein muss.

Eine mögliche Lösung des in Abbildung 2.5 angezeigten Belegungskonfliktes wäre die Planung einer Überholung im Bahnhof. Zug 2 kann dann an Zug 1 im freien Gleis des Bahnhofs vorbeifahren, wenn Zug 1 dort länger wartet wie in Abbildung 2.6 zu sehen. Aus den beiden Abbildungen ist auch zu entnehmen, dass ein Konflikt ggf. frühzeitig

2. Grundlagen

erkannt bzw. prognostiziert werden muss, um die Anzahl möglicher Lösungen zu erhöhen. Der Konflikt tritt hier eigentlich erst nach dem Bahnhof auf, da sich erst mit Eintritt in den eingleisigen Abschnitt die Sperrzeiten überlagern. Die vorgestellte Lösung dieses Konflikts liegt also zeitlich vor seinem Auftreten und bedeutet lediglich eine Haltezeitverlängerung von Zug 1. Die Verspätung von Zug 1, durch die der Konflikt evtl. entstanden ist, wird damit leicht erhöht.

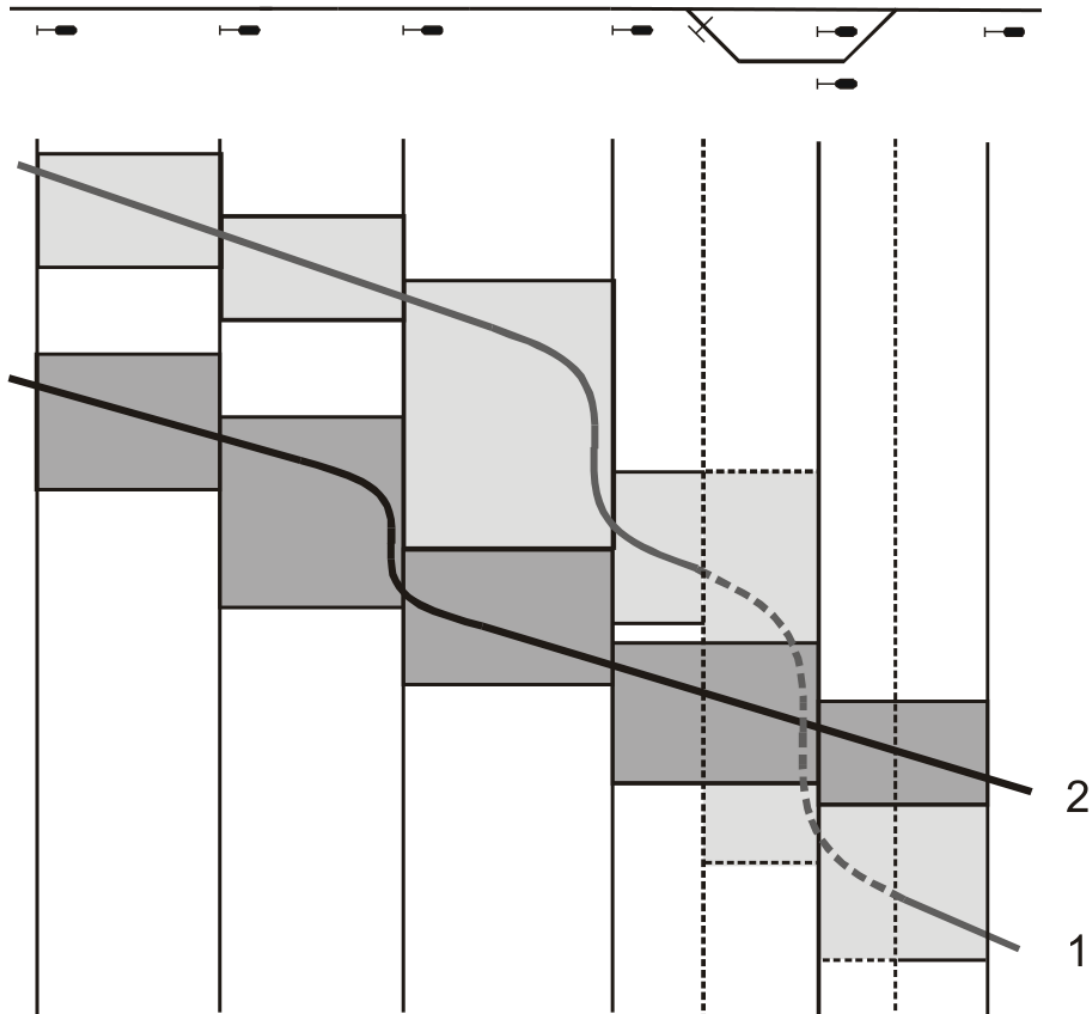


Abbildung 2.6.: Konfliktlösung durch Warten aus [16]

Mit ausreichender Reserve im Fahrplan (Fahrzeitreserven ausschöpfen oder Verkürzen der Haltezeiten) kann diese jedoch evtl. wieder reduziert werden. Die erhebliche Verminderung der Geschwindigkeit von Zug 2 im Fall der Verbiegung (stark unter-

schiedliche Steigung der Zeit-Weg-Linien) konnte allerdings vermieden werden. Diese wäre zu Lasten späterer Pünktlichkeit und ggf. ungeplanter erneuter Beschleunigung (Energieverbrauch) bei Zug 2 gegangen. Die Entscheidungen haben also Vor- und Nachteile welche je nach Energieverbrauch (insbesondere im Güterverkehr) und Prioritäten der Verspätungen (ICE > RE usw.) abzuwägen sind.

Das gleiche Szenario mit Warten im Bahnhof funktioniert auch wenn Zug 1 keinen Halt im Bahnhof plant (in Abbildung 2.5 ist der Halt als senkrechter Verlauf der Zeit-Weg-Linie zu erkennen). Dann muss jedoch der langsamere Zug 1 außerplanmäßig im Bahnhof halten, braucht durch den erneuten Anfahrvorgang deutlich mehr Leistung und verliert deutlich mehr Zeit. Dieser ungeplante Halt ist daher nur in Ausnahmefällen (z. B. ewig keine weitere Überholmöglichkeit) anzuwenden. Beladene Güterzüge mit ihrem hohen Gewicht ungeplant anhalten und erneut anfahren zu lassen hat hierbei die größten Folgen, allerdings aufgrund der ggf. noch geringeren Relativgeschwindigkeit auch den größten zeitlichen Nutzen für den Folgeverkehr.

Weitere Lösungen für Belegungskonflikte sind das Ausweichen auf Nebengleise zum Überholen, welche evtl. eine (ggf. langsamere) Weiterfahrt beider Züge erlauben. Allerdings sind an vielen Strecken keine solchen alternativen Gleise vorhanden sondern finden sich eher im Umfeld von Bahnhöfen. Die Benutzung des Gegengleises ist weiterhin aufgrund der oft fehlenden Blockunterteilung und der ggf. vorhandenen Benutzung für die Gegenrichtung schwierig. Die fehlende Blockteilung erfordert lange Sperrzeiten des Streckenabschnitts und die Benutzung für die Gegenrichtung wird bis zum Wechsel auf das Gleis der eigenen Richtung verhindert. Die Gleise an zweigleisigen Strecken werden daher regulär in jeweils nur einer Richtung betrieben. Das vollständige Umfahren einer Konfliktsituation über eine andere Strecke (z. B. auch bei Streckensperrung) erfolgt aufgrund des planerischen Aufwands für den Fahrweg ebenfalls nur in Ausnahmefällen. Um dem Belegungskonflikt vorzubeugen bzw. ein Verbiegen schon vor einem möglichen Bahnhof zu verhindern, kann auch eine Verkürzung der Fahrzeit des blockierenden Zuges sinnvoll erscheinen. Dieser verlängert dann ggf. seine Haltezeit im folgenden Bahnhof und hat einen höheren Energieverbrauch.

Lösungen für Anschlusskonflikte fallen je nach Anzahl betroffener Personen und Wichtigkeit der Anschlüsse unterschiedlich aus. Bei großem Bedarf sind selbst komplexe Lösungen wie ungeplante Halte, um den Fahrgastwechsel an einem anderen Bahnhof möglich zu machen, denkbar. Folgt auf den eigentlichen Abbringer ein weiterer Zug mit gleichem Fahrverlauf ist eine Anschlusssicherung ggf. sinnlos.

Diese Arbeit konzentriert sich auf Belegungskonflikte und die Möglichkeit der Überholung im Bahnhof durch ungeplante und verlängerte Haltezeiten.

2.3. Grundlagen der Simulation

Simulation dient der experimentellen Erforschung des Verhaltens eines Systems anhand eines Modells. Wenn die mathematische Beschreibung des Systems nicht vollständig möglich oder sehr komplex ist, ist die Beschreibung des Verhaltens als Modell ggf. prak-

2. Grundlagen

tikabler bzw. „natürlich“. Die Berechnung oder Simulation des Verhaltens ist dann von Bedeutung, wenn reale Erprobung nicht oder nur unter hohem Aufwand durchführbar ist. Durch die Erstellung des Modells wird das (reale oder geplante) System so weit abstrahiert, dass das Verhalten der zu berücksichtigten Systemkomponenten noch ausreichend genau abgebildet ist. Die Abstraktion kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen. Insbesondere in Systemen mit einer großen Anzahl von Systemteilnehmern, z. B. Fahrzeuge im Stadtverkehr, gibt es makroskopische und mikroskopische Modelle. Mikroskopische Modelle betrachten jedes Fahrzeug als einzelne Systemkomponente (dieses Fahrzeug biegt mit 20% Wahrscheinlichkeit an dieser Kreuzung ab). In makroskopischen Modellen werden die Fahrzeuge als Mengen oder Flüsse im Netz betrachtet und besitzen kein individuelles sondern ein statistisches Verhalten innerhalb der Gesamt- bzw. Teilmenge (an einer Kreuzung biegen immer etwa 20% der Fahrzeuge ab). Eine kurze Einführung in die Grundlagen der Simulation bietet [20].

2.3.1. Modellierung

Für die Durchführung einer Simulation muss das betrachtete System modelliert werden. Dazu müssen die Komponenten identifiziert werden, welche das zu untersuchende Verhalten maßgeblich beeinflussen. Im Beispiel des Straßenverkehrs ist das Verhalten der Beifahrer vermutlich von vernachlässigbarem Einfluss. Ob Fußgänger von Bedeutung sind, hängt vom Untersuchungsgebiet ab (Fußgängerampeln, nach oder bei Veranstaltungen ggf. auf der Straße). Die Erstellung des Modells ist dabei meist ein Zyklus der die folgenden Schritte beinhaltet (nach [10], [15] und [11]):

- (a) Erstellung/Anpassung von Systemmodell/Definition
- (b) Erstellung/Anpassung des Simulationsmodells
- (c) Simulation
- (d) Bewertung

Das Systemmodell beschreibt informell aber umfassend das Verhalten. Dazu werden die relevanten statischen und dynamischen Elemente des Systems identifiziert. Weiterhin ist es wichtig die sich ggf. über die (Modell-)Zeit verändernden Eigenschaften (Verhaltensgrößen) und welche Abhängigkeiten zwischen den Verhaltensgrößen und weiteren Elementen und deren Eigenschaften bestehen. Nicht aus anderen Verhaltensgrößen ableitbare, relevante Verhaltensgrößen werden als Zustandsgrößen bezeichnet. Für die Modellierung reicht die Beschreibung des Verhaltens der Zustandsgrößen über die Zeit, da sich alle anderen Verhaltensgrößen davon ableiten lassen können.

Im Simulationsmodell wird diese Verhaltensbeschreibung in eine durch Computersimulation ausführbare formelle Form gebracht. Innerhalb des Simulationsmodells wird stets eine Modellzeit verwendet, welche unabhängig von der Ausführungszeit des Modells sein kann, um z. B. Gleichzeitigkeit verschiedener Zustandsänderungen

zu simulieren. Die eigentliche Simulation findet dann mit dem erstellten Simulationsmodell statt und lässt ggf. Rückschlüsse über die Korrektheit der Modellierung zu. Je nach Bewertung der Ergebnisse der Simulation wird dann das Systemmodell oder das Simulationsmodell ergänzt/angepasst, um die Abweichungen zum erwarteten Verhalten zu korrigieren. Dieser Schritt ist je nach Vorlage des Systems schwierig, da es sein kann, dass das erwartete Verhalten nicht vollständig bekannt ist oder trotz falschem Verhaltens die Ergebnisse mit erwarteten Ergebnissen übereinstimmen (siehe [20]). Hier zeigt sich außerdem die Wichtigkeit der Simulationsauswertungen. Je nach Art des zu simulierenden Systems ist eine grafische und/oder textuelle Darstellung der Ergebnisse von großer Bedeutung, um die Korrektheit und die Ergebnisse nachvollziehbar zu machen. Nach der Anpassung der Modelle wird die Simulation erneut ausgeführt. Der Vorgang wiederholt sich bis das erwartete Verhalten mit der gewünschten Genauigkeit zu beobachten ist. Das so erstellte Simulationsmodell kann nun ggf. mit unterschiedlichen Eingaben das Systemverhalten in unterschiedlichen Situationen nachstellen.

Die Aufgabe von Bibliotheken oder Umgebungen zur Simulation (wie ODEmx und SLX in Unterabschnitten 2.3.3 und 2.3.4) ist die Vereinfachung der Umsetzung des Systemmodells in das jeweils ausführbare Simulationsmodell. Bei der Durchführung von Simulationen ist weiterhin die Wiederherstellbarkeit von Experimenten von großer Bedeutung, um mit ggf. geringen Anpassungen die Auswirkungen lediglich dieser Anpassung zu erforschen. Da für die Ausführung stochastischer Prozesse die Einführung von Zufallsgrößen wichtig ist, werden bei Computersimulationen in der Regel spezielle Pseudo-Zufallszahlen erzeugt. Die Generatoren der Zufallszahlen können dabei identische Werte bei mehrmaliger Ausführung der Simulation erzeugen.

2.3.2. Prinzipien

Für die Beschreibung der Veränderungen der Zustandsgrößen ist es von Bedeutung, wann diese stattfinden. Hierbei wird zwischen *zeitkontinuierlichen* und *zeitdiskreten* Zustandsänderungen unterschieden. Zeitkontinuierliche Zustandsänderungen finden zu allen Zeitpunkten der Modellzeit statt und können dabei zu jedem Zeitpunkt Auswirkungen auf weitere Zustandsänderungen haben. Zeitdiskrete Zustandsänderungen finden zu bestimmten Zeitpunkten (die sich auch erst während der Lebenszeit des Modells ergeben können) statt, die Zustandsgröße oder ihre Veränderung ist zu jeder Zeit zwischen diesen Zeitpunkten konstant oder irrelevant.

Ein Beispiel für den Einsatz der unterschiedlichen Arten der Zustandsänderung ist die unterschiedliche Abstandsregelung im Bahnverkehr. Beim Fahren im Blockabstand ist es nicht unbedingt von Bedeutung an welchem Punkt innerhalb eines Blocks sich der jeweilige Zug befindet (siehe 2.1.4), das Problem kann also zeitdiskret beschrieben werden (Befahren/Verlassen eines Blocks als diskrete Zeitpunkte). Beim Fahren im relativen oder absoluten Bremsabstand ist die relative Position und (ggf. relative) Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt von Bedeutung, das Problem lässt sich natürli-

2. Grundlagen

cherweise zeitkontinuierlich beschreiben. Eine Überführung in ein ggf. komplexeres zeitdiskretes Modell kann jedoch möglich sein. Zeitkontinuierliche Zustandsänderungen können nicht oder nur aufwändig durch (digitale) Computer simuliert werden, da zu einem gewissen Grad immer diskretisiert werden muss. Hierfür werden teilweise numerische Verfahren verwendet, welche eine automatisierte Diskretisierung (Abstand der Zeitpunkte variabel) bei Erhaltung der kontinuierlichen Modellierung erlauben (z. B. ODEmx, siehe [11]).

Weiterhin gibt es unterschiedliche Arten des Umgangs mit der Modellzeit. *Zeitgesteuerte* Simulationen erhöhen die Modellzeit in immer gleichen Zeitschritten (deswegen auch Zeitschrittverfahren). Nur zu diesen Zeitpunkten werden alle Zustandsgrößen betrachtet und ggf. verändert. *Ereignisbasierte* Simulationen erlauben variable Zeitschritte. Die Ausführung des Simulationsmodells beschränkt sich auf die Betrachtung von Zeitpunkten der Modellzeit zu denen bestimmte Ereignisse stattfinden. Die Ereignisse können sich dabei stark unterscheiden. Das Erreichen eines bestimmten Zeitpunkts kann als Ereignis gelten und so auch das Zeitschrittverfahren nachgebildet werden. Auch können bestimmte Änderungen von Zustandsgrößen als Ereignisse (z. B. wieder das Befahren/Verlassen eines Blocks) gelten, deren Eintrittszeitpunkte sich erst bei der Ausführung ergeben. Alle Zeitintervalle, welche „ereignislos“ sind, werden übersprungen und müssen nicht betrachtet werden. Deswegen heißt diese Art der Simulation auch *Next-Event-Simulation*.

Eine Unterklasse der ereignisbasierten Simulation ist die prozessbasierte Simulation. Hierbei unterscheidet das Simulationsmodell zwischen aktiven und passiven Objekten. Passive Objekte besitzen kein eigenes Verhalten innerhalb der Modellzeit und sind eine Art der Darstellung von Zustandsgrößen. Aktive Objekte werden als Prozesse bezeichnet, besitzen ein Verhalten und sind für die Änderungen der Zustandsgrößen zuständig. Mit Aktivierung der Prozesse beginnt ihre Lebenszeit und die dafür zuständige Methode wird ausgeführt. Innerhalb dieser Methode können die Prozesse z. B. Zustandsgrößen verändern, weitere Ereignisse festlegen/einplanen, andere Prozesse aktivieren oder selbst bis zu einem Ereignis warten und sich dann fortsetzen (siehe [20]).

Die Wahl der aktiven und passiven Objekte hat große Auswirkungen auf die Erstellung des Simulationsmodells und dessen Ausführung. Prinzipiell ist es z. B. möglich den gesamten Bahnverkehr durch einen komplexen Prozess zu simulieren. Weitere Möglichkeit für Prozesse sind Züge, deren Wagen oder z. B. das Personal. Je nach betrachteten Größen ist es wichtig nur notwendige aktive Objekte als Prozesse zu modellieren, da jeder Prozess die Laufzeit beeinflusst. Üblicherweise muss der gesamte Zustand der Ausführung, auch Kontext genannt (Wert temporärer und lokaler Variablen und die Position innerhalb der aktuellen Methode), eines Prozesses gespeichert und ein anderer wiederhergestellt werden, wenn der aktive Prozess wechselt. SLX und ODEmx sind (prozess- und) ereignisbasiert und werden am Lehrstuhl für Systemanalyse eingesetzt. Da das zu entwickelnde Simulationsmodell durch eine der beiden Möglichkeiten realisiert werden soll, werden sie im Folgenden kurz vorgestellt.

2.3.3. ODEMx

ODEM² ist wie die Überarbeitung ODEMx eine Bibliothek für C++ und am Lehrstuhl für Systemanalyse entwickelt worden. ODEMx befindet sich dort in der stetigen Weiterentwicklung (zu beziehen unter [22]), welche z. B. durch Studien- oder Diplomarbeiten stattfindet. ODEMx selbst ist durch eine Diplomarbeit 2003 aus ODEM entstanden ([13]).

Grundlage von ODEMx ist die Möglichkeit der objektorientierten Modellierung eines Systems mit C++. Sollen die Instanzen einer Klasse aktiv sein, implementiert diese die abstrakte Klasse *Process* oder *Continuous*. *Process* bietet dabei die üblichen Möglichkeiten der prozessbasierten Simulation mit der zu implementierenden Methode *main* (*pure virtual function*) zur Beschreibung des Verhaltens nach Aktivierung. Die Klasse *Continuous* bietet darüber hinaus die Methoden *derivatives* und *integrate*. In der zu implementierenden Methode *derivatives* wird die Änderungsrate der Zustandsgrößen (ggf. abhängig von diesen) festgelegt. Wird in *main* die Funktion *integrate* aufgerufen, wird bis zu einem Abbruchkriterium auf Basis der in *derivatives* beschriebenen Ableitung das Objekt quasi-kontinuierlich simuliert. Dazu werden die notwendigen Zeitschritte und Zustandsänderungen numerisch approximiert. Es ist notwendig bei Wechselwirkung mit „normalen“ Prozessen und anderweitigen Zustandsänderungen die Integration zu unterbrechen und neu zu starten, da die Ableitung neu berechnet werden muss. Durch die automatische Berechnung der Zeitschritte (es können allerdings Vorgaben gemacht werden) ist eine Synchronisation mit anderen Prozessen außerdem deutlich aufwändiger.

ODEMx bietet darüber hinaus zahlreiche Möglichkeiten der Synchronisation über weitere Objekte. Die Synchronisation und der Prozesswechsel sei anhand von *Bin* kurz vorgestellt.

Instanzen der Klasse *Bin* (engl. für Eimer/Behälter) dienen anhand einer Anzahl anonymer Token als Grundlage der Synchronisation. Mit den Methoden *give* und *take* lässt sich eine gewisse Anzahl von Token an die Instanz übergeben oder ihr abnehmen. Der Aufruf *give* kann jederzeit von einem aktiven Prozess geschehen und erhöht die Anzahl an Token. Ruft ein aktiver Prozess die Methode *take*, wird er in die *Bin*-interne Warteliste eingereiht. Sind nicht genug Token vorhanden und der Prozess ist nicht „an der Reihe“ (andere Prozesse vor ihm in der Warteliste), legt er sich per Methode *sleep* schlafen. Der Prozess wartet dann auf die Reaktivierung aus einem anderen Prozess heraus. Das jeweils nächste Ereignis in der Modellzeit wird aufgerufen bis eine Rückgabe von Token per *give* geschieht. Ist außerdem ein Prozess in der *Bin*-internen Warteliste, wird dieser (bzw. der zuerst gelistete Prozess) zum selben Modellzeitpunkt nach dem aktuellen Prozess reaktiviert. Mit Wechsel in den ursprünglich wartenden Prozess befindet sich dieser wieder in der Methode *take*. Sind nun die geforderten Token vorhanden, entfernt sich der Prozess aus der Liste und entfernt die Anzahl von Token. Reicht die Anzahl nicht, bleiben die Token erhalten

²Object oriented Discrete Event Modelling - Objektorientierte Diskrete Ereignis-Modellierung

2. Grundlagen

und der Prozess schläft wieder. Die Klasse *BinT* stellt das beschriebene Verhalten für konkrete Objekte (per Template zu bestimmen) zur Verfügung, welche in Bin nun statt anonymen Token-Anzahl verwaltet werden.

ODEMx bietet darüber hinaus Generatoren für verschieden verteilte Pseudo-Zufallszahlen (Gleichverteilung, Poisson, usw.), welche sich bei Bedarf immer wieder zurücksetzen lassen (setSeed). So können ab einem gewünschten Zeitpunkt wieder die selben Zufallszahlen erzeugt werden. Für die erzeugten Verteilungen und die Objekte zur Synchronisation wird eine umfangreiche Protokollierung angeboten, welche durch eigene Klassen ergänzt werden kann. Aus den erzeugten Statistiken können automatisch HTML-Dateien mit einer Übersicht erstellt werden. Die Übersicht enthält dann ggf. auch selbst beobachtete Größen, welche z. B. in Histogrammen oder einfachen Zählungen dargestellt werden. Dazu werden Instanzen der passenden Statistik-Art erstellt und bei einer Beobachtung aktualisiert.

2.3.4. SLX

SLX³ besteht aus einer kommerziellen Entwicklungs- und Ausführungsumgebung und der dort verwendeten Programmiersprache. Entwickelt wird SLX von Wolverine Software ([31]).

Die Sprache SLX

SLX bietet mit SLX 2 Objektorientierung, d.h. die Modellierung mit Klassen und Einfachvererbung mit Polymorphie. Bis zu dieser Version gab es nur die Möglichkeit zur Definition und (attribut- und methodenweise) Erweiterung von Klassen. Klassen können zu unterschiedlichen Modulen (vergleichbar mit Namensräumen) gehören. Die Definition von Methoden kann an einer anderen Stelle (außerhalb der Klasse und des Moduls) als die Deklaration stattfinden. Die Auflösung von Zugehörigkeiten findet wie bei C++ durch Qualifikation mittels Klasse und ggf. des Moduls statt. Im Gegensatz zu C++ muss die Definition der Methode aber vor ihrer Verwendung passieren. Bspw. muss in der Ableitung die *pure virtual function* definiert sein, bevor eine Instanz erzeugt werden kann. In C++ ist das erst beim Linken nötig, wenn alle Definitionen bekannt sind. Bei der Definition von Klassen muss, wie in der prozessorientierten Simulation üblich, zwischen aktiv und passiv unterschieden werden. Bei SLX können alle Klassen eine Verhaltensbeschreibung haben, solange diese nicht mit dem Schlüsselwort *passive* definiert wurden. Die Beschreibung des (diskreten) Verhaltens und der Konstruktion und Destruktion der Objekte finden in den sogenannten *properties*, vordefinierten Methoden (siehe Tabelle 2.3), statt.

SLX unterstützt weiterhin die dynamische Erzeugung von Objekten und die Definition von Zeiger (*pointer*) auf Objekte. Die Methoden *report* und *clear* (aus GPSS bekannt, siehe [21]) werden auch für vordefinierte Klassen definiert, um z. B. Statistiken

³Simulation Language with eXtensibilities - Simulationssprache mit Erweiterbarkeit

initial	Konstruktor, die Argumente stehen in der Signatur der Klassendefinition
final	Destruktor
destroy	Vorbereitung der Destruktion, welche nur funktioniert wenn es keine Referenzen mehr auf die Instanz gibt
report	Protokollierung, z. B. zur manuellen Definition der Statistik-Erstellung
clear	Zurücksetzen des Zustands, z. B. um mehrere Versuche mit diesem Objekt durchzuführen
actions	Verhaltensbeschreibung, wird mit Aktivierung des Objekts ausgeführt (nicht f. passive)

Tabelle 2.3.: Properties von SLX-Klassen

auszugeben oder das System (Modellzeit, usw.) zurückzusetzen. Diese Methoden sind bei eigenen Klassen insbesondere zum Protokollieren oder Zurücksetzen vieler Objekte von großem Nutzen, da diese auch durch den jeweiligen Aufruf auf Mengen dieser Objekte ausgeführt werden. Die Definition von Containern für Objekte findet mittels *set* (Menge) statt. Mengen beinhalten stets Zeiger und keine Objekte und können entweder auf Zeiger bestimmter Klassen spezialisiert sein oder beliebige Zeiger aufnehmen. Bei spezialisierten Mengen kann außerdem eine Sortierung definiert werden. Diese Sortierung kann auch zum Auffinden von Objekten bestimmter Eigenschaften verwendet werden. Im Gegensatz z. B. zum `std::set` in C++ ist die Sortierung nicht zwingend. In diesem Fall können die Pointer an beliebiger Stelle (Standard: am Ende) hinzugefügt werden. Die Mengeneigenschaft ist in allen Fällen gegeben, da auf jedes Objekt innerhalb des Containers nur einmal gezeigt werden kann.

Die Aktivität von Objekten wird über sogenannte *Pucks* gesteuert. Pucks sind intern die eigentlichen Prozesse, welche die Steuerung der Instanzen aktiver Klassen übernehmen. Auch die *main*-Methode (vgl. C und Java) des Simulationsmodells hat deshalb eine Puck-Entsprechung. Das Attribut *puck_object* eines Pucks verweist auf die dazugehörige Instanz der aktiven Klasse. Mit dem Prinzip der Pucks lassen sich auch mehrere Prozesse für ein aktives Objekt erzeugen. Mittels Schlüsselwort *fork* wird an beliebiger Stelle ein weiterer Puck erzeugt, welcher auf das aktuell aktive Objekt verweist. Der folgende Programm-Block wird dann ausschließlich vom erzeugten Puck ausgeführt, welcher als nächster zur Ausführung eingeplant wird. Wird der Puck innerhalb dieses Blocks nicht terminiert (Ende seiner Lebenszeit), wird der Puck die Ausführung analog zum erzeugenden Puck außerhalb des Blocks fortsetzen. Die erzeugten Pucks teilen sich somit das zugehörige Objekt und modellieren nun paralleles Verhalten innerhalb dieses Objekts.

Für die Synchronisation von Prozessen können (elementare) Verhaltensgrößen mit dem Präfix *control* ausgezeichnet werden (Kontroll-Variable). Dies findet auch bei vor-

2. Grundlagen

definierten Objekten Anwendung (z. B. das Attribut *size* in *set*). Solche Verhaltensgrößen können zum bedingten Warten von Pucks verwendet werden. Dem Befehl *wait until* folgt ein Ausdruck, welcher auf Wahrheit überprüfbar ist (Bedingung). Ist die Modellzeit Teil der Bedingung findet eine gesonderte Betrachtung statt und der Puck wird ggf. zu oder nach einem (bestimmten) Zeitpunkt reaktiviert. Ist die Modellzeit nicht Teil der Bedingung muss mindestens eine Kontroll-Variable enthalten sein. Die Bedingung wird überprüft, ist diese nicht erfüllt, wartet der Puck in einer zu jeder Kontroll-Variablen gehörigen Menge an Pucks. Diese Pucks werden reaktiviert nachdem die Kontroll-Variable durch andere Pucks geändert wurde. Der Reaktivierung folgt eine erneute Überprüfung der Bedingung und ggf. ein erneutes Warten. Auf diese Art wird das bedingte Warten effizient umgesetzt, da die Bedingung nur bei Wertänderung der betroffenen Verhaltensgrößen erneut überprüft werden muss.

Die Erweiterbarkeit der Sprache

Die Erweiterbarkeit im Akronym SLX³ definiert sich über die einfache Möglichkeit die Sprache mit Makros bzw. *Statements* zu erweitern. Die Makro-Definition mit *statement* ermöglicht es Anweisungen zur im Modell bekannten Sprache hinzuzufügen. Dazu wird die Signatur der Anweisung prototypisch beschrieben, wobei die Argumente als regulärer Ausdruck nach dem Namen folgen. Es folgt die Beschreibung der Anweisung, wobei hier bereits SLX-Programmcode enthalten sein kann, welcher keine Puck-Erzeugung oder -Steuerung betrifft (*fork*, *wait*, usw.), da dieser Code zur Kompilierzeit ausgeführt wird. Der Aufruf der Methode *expand* erzeugt Text, welcher vom SLX-Compiler interpretierbar sein muss und funktioniert dazu ähnlich *printf* in C. Der Aufruf von *expand* beinhaltet eine Reihe von Argumenten und eine Zeichenkette. Die in der Zeichenkette vorhandenen *#* werden in ihrer Reihenfolge durch die Argumente ersetzt.

Da *Statements* zur Kompilierzeit aufgelöst werden, ist es möglich zu dieser Zeit z. B. Dateien einzulesen. Der Inhalt ist dann ggf. bereits vor der eigentlichen Ausführung der Simulation bekannt und kann sogar Einfluss auf die weitere Übersetzung des SLX-Programms nehmen (siehe [27]).

Zur Veranschaulichung eines *Statements* wird im Folgenden die Umsetzung des GPSS-Elements *storage* (engl. für Lager) in SLX kurz erklärt.⁴ Eine Lager-Entität besitzt eine individuelle Kapazität, Auslastung und Verfügbarkeit. Andere Systemteilnehmer können nun Elemente zum Lager hinzufügen und entfernen oder die Verfügbarkeit des Lagers verändern. Es können maximal so viele Einheiten aus dem Lager entfernt werden (Aufruf von *LEAVE*), wie vorher hinzugefügt wurden (Aufruf von *ENTER*). Weiterhin können nur Einheiten eingebracht werden, wenn das Lager verfügbar und die Summe aus Auslastung und hinzuzufügenden Einheiten nicht die Kapazität übersteigt. Ansonsten wartet der Teilnehmer, der *ENTER* ausgeführt hat, bis beide Bedingungen erfüllt sind. Die Verfügbarkeit des Lagers kennt die beiden Zustände verfügbar (durch

⁴Der dazugehörige SLX-Programmcode ist in der Datei *h7.slx* im SLX-Verzeichnis enthalten.

Aufruf von *SAVAIL*) und nicht verfügbar (durch Aufruf von *SUNAVAIL*). Durch Wiederherstellung von Verfügbarkeit oder Verringerung der Auslastung werden auf ENTER wartende Teilnehmer reaktiviert (siehe [21]).

Die Attribute von storage werden für die Umsetzung in SLX als Klasse modelliert, welche auch statistische Größen erfasst. Die für den Zugriff notwendigen Methoden sind dann entweder Teil der Klasse oder eigenständige Prozeduren. Um die Verwendung in SLX an die Syntax von GPSS anzunähern werden dann Makros und Statements verwendet. Das für die Erzeugung eines Lager-Objekts definierte Statement sieht wie folgt aus:⁴

```

1 statement storage { #storage [ title = #report_title ] [capacity=#capy] },... ;
2   definition
3   {
4     int i;
5     for (i = 1; #storage[i] != ""; i += 1)
6     {
7       if (#report_title[i] == "")
8         expand(#storage[i]) "@storage #(\\" , ";
9       else
10        expand(#storage[i], #report_title[i]) "@storage #(#, ";
11
12       if (#capy[i] == "")
13         expand "1.0);\n";
14       else
15         expand(#capy[i]) "#);\n";
16     }
17 }

```

In Zeile 1 ist die Signatur mit regulärem Ausdruck enthalten. Mit dem Zeichen # werden Variablen benannt, welche bei Verwendung des Statements mit Zeichenketten belegt werden. Die eckigen Klammern umfassen optionale Bestandteile, welche durch Schlüsselwörter („title“ und „capacity“) voneinander unterschieden werden können. Mit Punkten am Ende des regulären Ausdrucks wird die beliebige Wiederholung des geklammerten Bereichs erlaubt. Der Aufruf zur Verwendung besteht damit immer mindestens aus „storage“ gefolgt von einer Zeichenkette zur Variablen „#storage“. Der Definitionsteil des Statements iteriert in Zeile 4 über alle Zeichenketten im Feld „#storage“. Die Variable ist als Feld zu behandeln, da die Wiederholung der Argumente möglich war. Für jede Belegung der Variablen in einer Wiederholung wird ein neuer Eintrag im Feld belegt. Fehlt diese Belegung der obligatorischen Variablen, ist der Aufruf vollständig bearbeitet.

Die optional zu belegenden Variablen „#report_title“ und „#capacity“ werden jeweils auf Belegung innerhalb der Wiederholung des Ausdrucks überprüft. In Abhängigkeit davon finden unterschiedliche Aufrufe von expand statt. Die Ausführung von expand erzeugt dann in Abhängigkeit der Eingabe Programmcode, welcher an die Stelle der Verwendung tritt und so viele Instanzen vom Typ storage erzeugt (das dient der Unterscheidung vom Statement), wie es Wiederholungen der Argumente gibt. Die Benennung der Instanzen ergibt sich im Ergebnis aus dem obligatorischen Argument „#storage“ und die weiteren Argumente werden falls vorhanden an den Konstruktor der Klasse übergeben. Die Verwendung der Instanzen kann nach Aufruf des Statements im Programmcode geschehen. Die Umsetzung der oben genannten Eingriffe in das Lager als Statement verfahren dann nach folgendem Muster:⁴

2. Grundlagen

```
1 | statement enter #storage [units=#units];
2 |   definition
3 |   {
4 |     if (#units == "")
5 |       expand(#storage) "ENTER(, 1.0);\n";
6 |     else
7 |       expand(#storage, #units) "ENTER(, #);\n";
8 |   }
```

Dem Aufruf von *enter* gefolgt von dem Bezeichner einer storage-Instanz kann noch die Anzahl an Elementen, welche hinzugefügt werden sollen, folgen. Der vom Statement erzeugte Programmcode ruft die Methode ENTER, welcher als erstes Argument die storage-Instanz und als zweites Argument die Anzahl an Elementen enthält. Fehlt die letzte Angabe, wird schon vom Compiler ein Standardwert (1) übergeben. Als Beispiel für die Verwendung beider definierten Statements:

```
1 | storage lager capacity=200;
2 | enter lager units=40;
```

In Zeile 1 wird die Instanz „lager“ deklariert und definiert mit der Kapazität von 200 Einheiten, die Bezeichnung des Lagers für die Report-Erstellung ist leer. In Zeile 2 folgt die Verwendung des Lagers und die Belegung mit 40 Einheiten nach dem erläuterten Prinzip.

Die Simulationsumgebung SLX

Die Simulationsumgebung SLX ist für die Entwicklung und Ausführung von SLX-Programmen zuständig. Das Programm ist nur für Microsoft Windows verfügbar und verfügt über verschiedene Werkzeuge zur Wartung der SLX-Programme. SLX kann als Anwendung mit grafischer Oberfläche ausgeführt werden oder als Konsolenanwendung direkt ein SLX-Programm ausführen. Die grafische Oberfläche zeigt in der Startansicht ein Konsolen-Fenster, mit dem Öffnen von SLX-Dateien werden diese daneben angezeigt. Das Konsolenfenster dient wie bei der Konsolenanwendung hauptsächlich zur Anzeige von per *print* gewünschten Ausgaben, gibt aber z. B. auch eine kurze Statistik bei erfolgreicher Übersetzung des SLX-Programms.

Übersetzung und Ausführung werden jeweils über Knöpfe gestartet, wobei die Ausführung jederzeit unterbrochen werden kann. Nach der Übersetzung werden Fehler und Warnungen direkt hinter der betroffenen Stelle in die Anzeige des Programmcodes integriert. Zur Überwachung des Programmablaufs sind die üblichen Methoden wie Haltepunkte und die Anzeige der Variablen-Werte möglich. Weiterhin kann z. B. nach Unterbrechung durch einen Haltepunkt die Ausführung schrittweise fortgesetzt werden. Im Programm enthalten ist auch eine Laufzeitanalyse enthalten, welche zu Methodenaufrufen und relevanten Code-Zeilen anzeigen kann, wie groß Anzahl des Auftretens und Zeitaufwand waren. Die Analyse von Flaschenhälsen bei der Ausführung wird so vereinfacht.

Proof Animation

Das Programm *Proof Animation*, das zusammen mit SLX installiert wird, ist eine ebenfalls von Wolverine Software entwickelte kommerzielle Anwendung. Proof Animation dient der grafischen Anzeige von Simulationsergebnissen. Dafür werden anzuzeigende Elemente in einer Layout-Datei zeilenweise definiert. In Trace-Dateien (ebenfalls zeilenweise Folge von Anweisungen) können diese Elemente dann zur Darstellung verwendet werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit Änderungen in Abhängigkeit von Modellzeit anzugeben oder die Modellzeit vor der nächsten Anweisung zu erhöhen und so Animationen zu erstellen. Die Animationen müssen dann nicht synchron mit der eigentlichen Simulation ausgeführt werden, sondern können nachträglich in unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Ausführungszeit zu Modellzeit) dargestellt werden. Für SLX existieren in den Dateien `proof4.slx` und `proof3d.slx` Module, welche für die Ausgabe der genannten Dateien einige (wenige) Statements zur Verfügung stellen.

3. Motivation und Situation

Dieses Kapitel bietet eine Einführung in die Motivation dieser Arbeit. In Abschnitt 3.1 wird das Projekt PiLoNav und das dazugehörige Programm *Operatives Verkehrsmanagement* (OVM-Tool) vorgestellt. Das OVM-Tool soll Lösungsvorschläge zur aktuellen Situation zur Verfügung stellen und motivierte damit diese Arbeit. Durch die Analyse im Rahmen der Arbeit sollen verschiedene Szenarien der Konfliktlösung evaluiert und eventuell so die Erstellung von Lösungsvorschlägen optimiert werden können. Dazu wird in Abschnitt 3.2 die Situation in der Fahrplanerstellung und Simulation des Bahnverkehrs erläutert. Die Vor- und Nachteile der bisherigen Verfahren werden bei der Entwicklung und späteren Bewertung des Modells berücksichtigt. In Abschnitt 3.3 folgen die Anforderungen an das zu erstellende Simulationsmodell bevor im folgenden Kapitel das Modell erstellt wird.

3.1. Das Projekt PiLoNav

PiLoNav steht für *Hochgenaue und verlässliche Ortung und Navigation im Schienen- und Wasserverkehr* (*Precise and integer Localisation and Navigation in Rail and Inlandwater Traffic*). Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert und durch verschiedene Projektpartner aus Wissenschaft und Wirtschaft betreut. Dazu gehört auch das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrum Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig. Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell ist in Zusammenarbeit mit diesem Institut entstanden.

3.1.1. Zielstellung

Ziel des Projekts PiLoNav ist die Optimierung des Verkehrsflusses in Binnenschifffahrt und Bahnverkehr zur Steigerung der (Energie-)Effizienz (siehe [7]). Dazu soll als Teil des Projekts die kontinuierliche und exakte Ortung der Fahrzeuge ermöglicht werden. Im Bahnverkehr werden sicherheitskritische Einrichtungen bislang durch die in Unterabschnitt 2.1 genannten ortsfesten Sensoren gesteuert. Die Interpolation der Position zwischen den ortsfesten Einrichtungen kann, wenn überhaupt, durch die Fahrzeuge stattfinden. Eine kontinuierliche fahrzeugseitige Positionsbestimmung (mittels TLU - Train Location Unit/Zug-Ortungseinheit) soll mit exakten Ergebnissen die effizientere Steuerung des Betriebs ermöglichen. Im Bahnverkehr beschränkt sich die seltene Verwendung von GPS-Sensoren aufgrund der Genauigkeit (etwa wegen Abschattung durch Oberleitungen oder Tunnel) allerdings höchstens auf die Information der Disponenten und Fahrgäste. Methoden wie das Fahren im Bremsabstand sind auf diese Weise nicht

umsetzbar. Sicherheitskritische Einrichtungen wie Signalanlagen an Bahnübergängen oder im Schienennetz können weiterhin nicht oder nur in Maßen auf die (Änderung der) Geschwindigkeit angepasst schalten.

3.1.2. Operatives Verkehrsmanagement

Die Anwendung für Operatives Verkehrsmanagement (OVM-Tool), welche auch im Rahmen des Projekts (konzeptionell) entsteht, soll die Daten der TLU auswerten. Mittels des Fahrplans und der genauen Ist-Daten der Züge soll eine Prognose der Betriebs-situation erstellt werden und auftretende Konflikte bzw. Abweichungen vom geplanten Betriebsablauf erkannt werden. Durch die Berechnung möglicher Konfliktlösungen sollen Vorschläge zur effizienten Fortsetzung des Betriebs bzw. Rückkehr zum geplanten Betrieb gestellt werden. Die Empfehlungen sollen auf Basis von prognostiziertem Energieverbrauch, Verspätungsabbau und eingehaltenen Anschlussbeziehungen erfolgen. Zur Umsetzung der Fahrempfehlungen gehört auch der Fluss von Daten an die Züge, die dem Triebfahrzeugführer die für die aktuelle Situation optimalen Geschwindigkeiten und Bremspunkte vorschlagen (siehe auch Unterabschnitt 2.1.5).

3.2. Simulation und Fahrplanerstellung im Bahnverkehr

In der Simulation des Bahnverkehrs werden *synchrone* und *asynchrone* Verfahren unterschieden. Bei synchronen Verfahren werden alle Teilnehmer in einer Simulation berechnet. Anhand des aktuellen Zustands der Simulationsobjekte wird dann in (konstanten oder variablen) Zeitschritten ihr jeweiliger Folgezustand berechnet. Dabei werden Prioritäten von Zügen (ICE soll Vorrang vor einem RB bekommen) nicht direkt betrachtet und Konflikte werden erst bei einem Versuch einer Blockbelegung/-reservierung erkannt. Kommen sich also zwei Züge auf einer eingleisigen Strecke entgegen, wird der Konflikt bei einem optimistischen Ansatz (Verwendung des jeweils notwendigen Blocks ohne Vor-Reservierung weiterer Blöcke) erst auftreten, wenn beide Züge sich bereits auf der eingleisigen Strecke befinden. So kann ein Deadlock eintreten, da beiden Zügen eine Weiterfahrt in den nächsten Block nicht möglich ist (siehe [16] und [26]). Durch Vorausbelegung je nach Strecke (eingleisige Strecken bis zum nächsten Bahnhof oder Nebengleis) oder Priorität (Züge höherer Priorität belegen eine höhere Anzahl an Blockabschnitten im Voraus) lassen sich diese Probleme umgehen. Die Lösung ist allerdings mit Komplexität und Abweichen von der Betrachtung der aktuellen Modellzeit erkauft. Weiterhin muss die Vorausbelegung anders behandelt werden, um eigentlich nicht auftretende Konflikte (etwa bei kreuzenden Fahrten) zu ignorieren, da sonst die Streckenkapazität durch lange Sperrzeiten unnötig herabgesetzt wird.

Bei den asynchronen Verfahren werden alle Züge nach ihrer Priorität „eingelegt“. Zuerst werden die Züge höchster Priorität bearbeitet und entweder vollständig oder Abschnittsweise (z. B. bis zum nächsten Bahnhof) bearbeitet. Beim Einlegen der Züge der nächsten Priorität, sind die Sperrzeiten durch die vorherigen Simulationsschritte

3. Motivation und Situation

vorgegeben. Das wesentliche Vorgehen entspricht sonst der synchronen Simulation. Entstehen Konflikte, weil nicht genug Zeit zwischen Sperrzeiten ist, haben die bereits eingelegten Züge höhere Priorität. Lässt sich ein Konflikt nicht lösen, wird der Vorgang für den bereits eingelegten Zug ggf. erneut gestartet. Das asynchrone Verfahren ist aufgrund des schrittweisen Vorgehens (bis zu einem ggf. konfliktfreien Betrieb) und der Abbildung von Prioritäten eher zur Fahrplankonstruktion geeignet. Die synchrone Vorgehensweise bietet sich vor allem bei einem bekannten Fahrplan zur Betriebssimulation an. Bei der Betriebssimulation werden Störungen und Dispositionsentscheidungen und deren Einfluss simuliert. Dies kann bei der Bewertung der Qualität von Fahrplänen oder beim Umgang mit konkreten Störungen hilfreich sein. Die asynchronen Verfahren sind in ihrer ursprünglichen Form weniger sinnvoll für die Betriebssimulation, da das grundsätzliche Ziel der Einlegung einer Priorität die Beibehaltung (oder höchstens Verschiebung) vorheriger Einlegungen ist. Belegungskonflikte, die bei der Simulation von Verspätungen entstanden sind, haben aber ggf. Auswirkungen auf die Züge aller Prioritäten und damit deren Fahr- und Haltezeiten. Die Änderungen durch Verbiegen und Nutzung von Fahrzeitreserven würde die Neuberechnung dieser bereits eingelegten Zeiten notwendig machen. Notwendig wird eine Neuberechnung ggf. auch bei „partielltem Vorrang“, also wenn ein Zug höherer Priorität nachrangig behandelt wird, um eine deutlich nachteiligere Behandlung eines anderen Zuges zu verhindern (siehe [16] und [25]).

Name	Art	Besonderheiten
RUT-0 ¹	grafisch	Anzeige der Sperrzeiten, manuelle Konfliktlösung mit Rechner-Unterstützung
SIMU VII	synchron	blockierende Vorausbelegung für Prioritäten, keine Fahrwegalternativen
RailSys	synchron ²	Vorausberechnung von Sperrzeiten für Prioritäten, kein Deadlock durch Vorausschau
STRESI	asynchron	feste Fahr- und Sperrzeiten (kein Verbiegen), vereinfachtes Netz, nur zweigleisige Strecken, nur Einbruchverspätungen
NSIM	asynchron	abschnittsweises Einlegen, auch größere Netze, Definition von Fahrwegalternativen für jeden Zug
BABSI	asynchron	basiert auf FAKTUS (von RUT-0), autom. Konfliktlösung, keine Fahrzeitverlängerung
ASDIS	asynchron	synchrones Einlegen einer Hierarchiestufe ohne Konfliktbehandlung, Konfliktlösung vor nächster Einlege-Stufe
DisKon	asynchron	ergänzt ASDIS um Nutzung von ANDIS (Anschlussdisposition)

¹ Priorität: Fahrplankonstruktion ² Fahrplankonstruktion asynchron

Tabelle 3.1.: Verfahren/Programme zum Betriebsablauf

Zur Berechnung des Bahnverkehrs kommen auch andere Ansätze als die Computersimulation zur Anwendung, allerdings meist nur im Bereich der Forschung. Die erste tatsächlich eingesetzte Methode war die rechnerunterstützte grafische Darstellung von prognostizierten Zeit-Weg-Linien, welche (später) um Sperrzeiten ergänzt wurden. Die Modellierung als rein mathematische Problemstellung (z. B. mit Lösung durch lineare Optimierung) findet sich z. B. in [12] und [2]. Nachteile der mathematischen Modellierung sind die schwer oder nicht darstellbaren Lösungswege bei der Konflikterkennung und -lösung, bei der ggf. eine Teilmenge der (Un-)Gleichungen nicht erfüllt werden konnten. Es existieren auch Ansätze zur wissensbasierten Entscheidungsfindung, welche anhand der Erfahrungen der Disponenten eine Wissensdatenbank mit möglichen Handlungen bei verschiedenen Konflikten verwenden. Für den Vergleich von synchronen und asynchronen Verfahren und Referenz auf weitere Möglichkeiten sei auf [16] und [23] verwiesen. In Tabelle 3.1 wird ein Überblick über vorhandene oder in der Entwicklung befindliche Verfahren gegeben (aus [1],[14],[16] und [25]).

3.3. Anforderungen an ein Simulationsmodell

Die Anforderungen an das Modell sind wichtig für die Festlegung der zu betrachtenden Verhaltensgrößen. Die existierenden Lösungsverfahren meist nach festgelegten Regeln bei der Behandlung von Konflikten oder besitzen starke Einschränkungen in Bezug auf die detaillierte Berechnung (Fahrzeiten, Energieverbrauch, Sperrzeiten). Mit der Simulation sollen verschiedene Dispositionsszenarien an einem existenten Fahrplan verglichen werden können. Dazu muss auch festgelegt werden, auf welche Größen bei der Disposition oder vor einer Simulation Einfluss genommen werden muss. Zur Beurteilung der Performanz wird außerdem die Anzahl der Züge und die Komplexität und Ausdehnung des Netzes abgeschätzt. So kann eine durchgeführte Simulation sinnvoll bewertet und die Einsetzbarkeit des Simulationsmodells aufgrund der Laufzeit eingeordnet werden. Mit der Einordnung bieten sich eventuell auch nachträgliche Anpassungen an, um Performanz oder Genauigkeit bzw. Abbildungsmöglichkeiten zu erhöhen.

3.3.1. Kriterien zur Berechnung

Die für den Vergleich der Szenarien wichtigen Kriterien sind insbesondere durch das Projekt PiLoNav (siehe Abschnitt 3.1) vorgegeben. Entscheidend sind Verspätungen, Energieverbräuche und Auslastung der Netzelemente.

Wichtig sind nicht nur die ausgehenden Verspätungen (Ausschubverspätung) und der erreichte Verspätungsabbau sondern auch zwischendurch auftretende Verspätungen und ggf. Anschlussverluste. In vielen Lösungen zur Betriebssimulation findet weiterhin keine Betrachtung oder Optimierung des Energieverbrauchs statt. Dieser ist neben den Verspätungen ein wichtiges Kriterium im zu entwickelnden Simulationsmodell. Die Berechnung des Energieverbrauchs verlangt eine ausreichend detaillierte Betrachtung der Fahrweisen, da diese mit Beschleunigungsverhalten und Geschwindigkeit wesentli-

3. Motivation und Situation

chen Einfluss auf die notwendige Leistung haben (siehe Unterabschnitt 2.1.2). Die ausreichend genaue Berechnung der Fahrweise und damit auch der Fahrzeit wird auch für den Verspätungsabbau und die sich ergebenden Sperrzeiten für die Bestimmung ggf. weiterer Belegungskonflikte benötigt. Die Präzision bei der Berechnung von Belegungskonflikten ist wiederum von der Genauigkeit der Abbildung der zur Fahrstraßenbildung und -auflösung notwendigen Netzelemente abhängig (siehe Unterabschnitt 2.1.1).

3.3.2. Anforderungen und Beschränkungen

Als zuerst zu untersuchende dispositive Maßnahme wurde die Überholung im Bahnhof durch Einbringung oder Verlängerung einer Haltezeit festgelegt. Weitere Maßnahmen zur Konfliktlösung (siehe Unterabschnitt 2.2.3) sind im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Jede Maßnahme soll zum Vergleich mit dem Verbiegen verglichen werden können.

Das Netz mit den notwendigen Eigenschaften der Elemente muss eingegeben werden können. Da bislang lediglich das Fahren im Raumabstand in Deutschland eingesetzt wird, gehören Blockabschnitte dazu. Die Beschreibung des Netzes kann außerdem stark vereinfacht werden, um die Komplexität bei der Umsetzung zu reduzieren (für Vorschläge zur Detaillierung siehe Abschnitt 5.3). Durch die Beschränkung auf das Überholen im Bahnhof wird auch die Verwendung eines Gleises pro Richtung als ausreichend erachtet.

Wichtig für die Betriebssimulation ist weiterhin ein vorgegebener Fahrplan mit Konflikten oder ohne Konflikte aber mit Möglichkeit zur Simulation von statistisch verteilten Störungen (siehe Tabelle 2.2). Eingabedaten sind weiterhin unterschiedliche Zugparameter, welche für die Berechnung von Energieverbrauch und Fahrzeiten wichtig sind. Um die Reihenfolge der durch Fahrplanstörungen beeinflussten Züge realistisch zu berechnen, ist außerdem die Einbringung von Anschlussbeziehungen zwischen Zügen sinnvoll. Die gesonderte Betrachtung von Umläufen ist nicht angedacht, lässt sich aber (allerdings ohne Kurswagen, Ersatzzüge/-personal) auch durch die Modellierung eines Umlaufs als Fahrt substituieren.

3.3.3. Größe und Anzahl der Elemente

Der typische Betrachtungsbereich eines Disponenten ist in [25] beschrieben und ist abhängig von der Belastung und Komplexität des Netzabschnitts. Dort wird der Dispositionshorizont für Belegungskonflikte diskutiert. Laut [16] liegt seit der Einführung der rechnerunterstützten Zugüberwachung der Überwachungsbereich bei 100 bis 270km. Zur Anzahl von Zugfahrten lassen sich in den betrachteten Schriften keine Angaben finden. Für die vom DLR vorgeschlagene Teststrecke von Hamburg-Harburg nach Lehrte (etwa 150km) lassen sich allerdings in [29] Angaben finden. Diese gehen im Fahrplan 2001/2002 von etwa 120 bis 170 Fahrten pro Richtung (davon etwa 60 bis 70 Güterzüge) aus. Im Fahrplan der Deutschen Bahn (siehe [5]) lassen sich dort aktuell allein 110

Fahrten des Personenverkehrs finden, welche mindestens Dienstag bis Donnerstag verkehren. Wird eine gleichbleibende Auslastung durch Güterzüge angenommen, ergeben sich also weiterhin ungefähr 170 Fahrten an einem normalen Werktag. Ignoriert man Ungleichverteilung der Fahrten über den Tag, ergeben sich somit etwa 7 Fahrten pro Stunde.

3.3.4. Komplexitätsbetrachtung der Überholung

Unter der Annahme, dass Überholungen nur in Bahnhöfen stattfinden können, ergibt sich eine obere Schranke der möglichen Ausführungsvarianten/Zugreihenfolgen. Die Anzahl möglicher Veränderungen der Reihenfolge (Überholvorgänge) entspricht der Anzahl der Bahnhöfe (mehr als 1 Bahnsteig pro Richtung), nur dort kann die Reihenfolge wechseln. Die Anzahl möglicher Reihenfolgen sei begrenzt durch die Anzahl der Züge, da sich ggf. die Reihenfolge der Fahrten mehrfach ändern kann (kurzfristiger Vorrang vllt. sinnvoll). Einschränkendes Kriterium wäre prinzipiell die Anzahl der Überholmöglichkeiten im Bahnhof, ist diese nicht begrenzt, kann sich die Reihenfolge an jedem Bahnhof komplett ändern. Für n Fahrten ergeben sich dann maximal $(n!)^b$ mögliche Varianten (für kurzen Beweis siehe A.1).

Schon für die Beschränkung auf die durchschnittlichen 7 Fahrten, würden sich bei 10 Bahnhöfen etwa 10^{37} Varianten ergeben. Beschränkt man die Permutationen auf das realistische Verschieben um eine Stelle nach hinten ergeben sich pro Bahnhof nur noch 2^{n-1} Möglichkeiten (jeder Zug wartet einmal oder wartet nicht, der letzte Zug kann nicht warten), aber bei 7 Fahrten und 10 Bahnhöfen immer noch etwa 10^{18} Varianten. Die Betrachtung möglicher Varianten muss daher realistisch und eine weitere Permutation einer vorhandenen Variante von deren Ergebnis abhängig gemacht werden. Die (sinnlose) Simulation bestimmter, theoretisch möglicher Permutationen für einen Vergleich ist somit nicht einmal für 7 Fahrten realistisch.

4. Lösungsansatz

In diesem Kapitel wird die entstandene Lösung beschrieben. Nachdem in Kapitel 3 die Anforderungen an das Simulationsmodell erläutert wurden, geht es in Abschnitt 4.1 um das Modell, welches Grundlage zum Vergleich der Konfliktlösungsstrategien ist. Dort wird erklärt, wie das Modell entwickelt wurde und dessen Details vorgestellt. Dafür geht es zuerst um die Abstraktion der Realität in Form von Klassen. Dann wird auf den eigentlich Simulations-Ablauf eingegangen. Der Abschnitt 4.2 beschreibt die Eingabedaten und das Testszenario. Die Simulation des Szenarios diente der Evaluation des Modells und der Gewinnung von Ergebnissen. In Abschnitt 4.3 folgt eine Beschreibung der Ausgabedaten, welche für eine Evaluierung der Simulationsläufe notwendig sind. Abschnitt 4.4 ergänzt das Kapitel um Anmerkungen zu Besonderheiten von SLX, welche bei der Entwicklung des Simulationsmodells aufgefallen sind.

4.1. Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wurde in SLX objektorientiert umgesetzt. Für eine ausreichend genaue Abbildung des statischen Netzes und der darauf zu berechnenden Fahrphysik musste eine geeignete Abstraktion gefunden werden. Das entwickelte Netzmodell stellt einen Kompromiss zwischen notwendiger Ausführungszeit und Komplexität (z. B. Einfluss der Anzahl an notwendigen Netzkomponenten/Belegungselementen) sowie der Genauigkeit oder auch den Abbildungsmöglichkeiten dar. Eine Zielstellung bei der Konzeption des Netzmodells war es auch, die Fahrt auf unmöglichen Wegen (siehe auch Unterabschnitt 2.1.1) erst gar nicht simulieren zu können. So sollte eine Ursache möglicher Fehler bei der Simulation ausgeschlossen werden, insbesondere falls Wegfindung bzw. der Betrieb in zwei Richtungen nachträglich eingebaut würde.

Die Abbildung der Fahrphysik ist für eine ausreichend genaue Berechnung von Fahr- und damit Belegungszeiten und Energieverbräuchen entscheidend. Hierfür wurde überlegt, welche Fahr-Situationen von Bedeutung sind und welche Daten zur Berechnung zur Verfügung gestellt werden könnten. Das entwickelte Modell verteilt sich auf unterschiedliche SLX-Dateien, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Die *Classes-Dateien enthalten jeweils die dargestellten Klassen-Definitionen, welche in den folgenden Unterabschnitten erläutert werden. Innerhalb der Klassen werden dann auch ggf. die SLX-Methoden *initial*, *report*, *clear*, usw. definiert. Die weiteren Methoden-Definitionen finden in den Dateien mit dem jeweiligen Präfix als Namen statt. Die *simulation.slx* steuert den Programmablauf und enthält die für SLX wichtige Prozedur *main()*. Die Datei *outext.slx* kapselt Klassen und Methoden zum Logging und zur

Ausgabe der Animationsdateien.

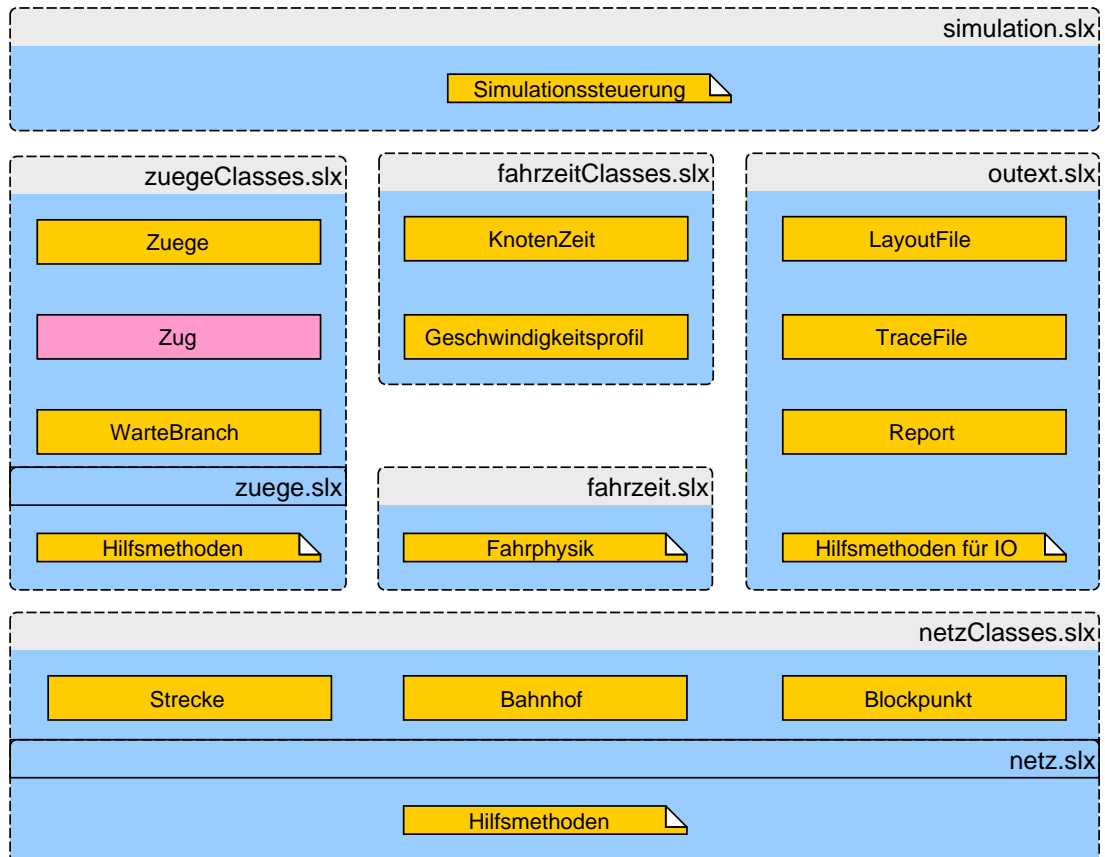


Abbildung 4.1.: Übersicht der Dateien des Simulationsmodells

4.1.1. Netz-Klassen

Das Netz wurde als Grundlage des Modells zuerst umgesetzt. Um die bei der Benutzung des Netzes auftretenden Konflikte erkennen zu können, mussten begrenzt nutzbare Ressourcen umgesetzt werden. Diese variieren je nach Netzelement, da z. B. Bahnhöfe oft von mehreren Zügen gleichzeitig befahren/benutzt werden können, ein normaler Gleisabschnitt aber nicht. Das modellierte Netz besteht aus drei Strukturen (siehe auch Abbildung 4.2):

- (a) Strecke
- (b) Blockpunkt
- (c) Bahnhof

4. Lösungsansatz

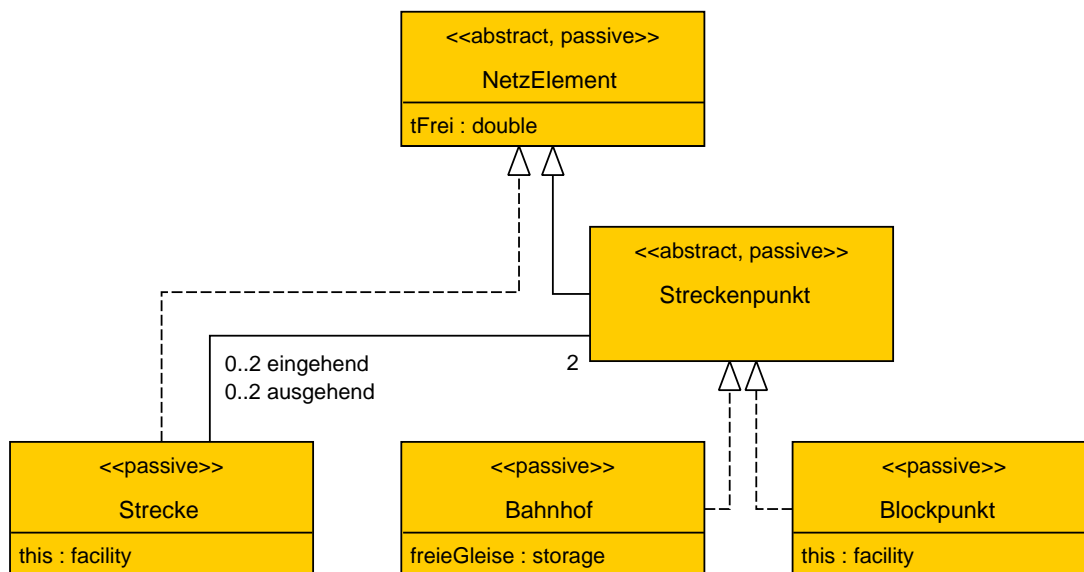


Abbildung 4.2.: Klassendiagramm: Netz (nur Attribute zur Nutzungsbegrenzung)

Eine Strecke verbindet je zwei Streckenpunkte (Blockpunkt oder Bahnhof) miteinander. Ein Streckenpunkt beschreibt ein Hauptsignal (und ggf. eine Weiche) und beginnt bzw. beendet damit einen Blockabschnitt. Ein Blockpunkt ist eine einfache Realisierung eines Streckenpunkts. Ein Bahnhof kann mehrere Gleise haben und bietet damit eine Möglichkeit zum Überholen. Das Netz-Modell vereinfacht das reale Netz auf die Betrachtung von Blockabschnitten und Bahnhöfen. In der umgesetzten Variante liegen Weichen höchstens am Anfang oder Ende von Blockabschnitten. Damit wird von den teilweise komplexen realen Weichen-Systemen abstrahiert und nur „Ein- und Ausgang“ eines Blockabschnitts betrachtet.

Jedes Netzelement bietet Methoden zur Blockierung und Freigabe der Ressource. Für Blockpunkte und Strecken dient das aus GPSS bekannte Element *FACILITY* als steuerndes Attribut (für Erläuterungen zu typischen Simulations-Elementen siehe Unterabschnitt 2.3.4), da sie nur von jeweils einem Zug belegt werden dürfen. Für Bahnhöfe wird *STORAGE* (siehe Unterabschnitt 2.3.4) verwendet, da Bahnhöfe häufig über mehrere parallele Gleise verfügen. Da für die Berechnung von fahrphysikalischen Größen die Streckenlänge und Höchstgeschwindigkeit entscheidend sind, verfügen die Strecken über beide Angaben. Blockpunkte beenden lediglich einen Blockabschnitt und besitzen daher keine solche Attribute. Bahnhöfe werden mit einer konstanten Länge von 800 Metern betrachtet, diese Länge wird von der angegebenen Streckenlänge abgezogen. Die modellierten Bahnhöfe stellen außerdem keine eigenständigen Blockabschnitte dar (lediglich mit Stillstand befindet sich ein Zug nur in einem Bahnhof als „Abschnitt“). Daher dient die Längenangabe hauptsächlich der späteren Darstellung. So kommen

gegenläufige Fahrten ggf. nicht am selben Punkt zum Stillstand, sondern um die Länge versetzt.

Zur Abbildung von Weichen wurde das Netz als Doppelpunktgraph umgesetzt (wie in [15] erläutert). Dazu verfügen die Streckenpunkte über getrennte Ein- und Ausgänge. Eine Fahrt kann an einem Streckenpunkt nur über Ausgänge fortgesetzt werden, wenn der Punkt über die Eingänge erreicht wurde und umgekehrt. Eine Ausnahme bilden in dem vereinfachten Modell Stichfahrten in Bahnhöfen, wie sie z. B. immer in Kopfbahnhöfen (z. B. Stuttgart Hbf) stattfinden.

4.1.2. Fahrt-Klassen

Um die Dynamik des Betriebs zu simulieren werden die Züge als aktive Objekte modelliert. Als Maßgabe dient dann ein Fahrplan, der ihre Bewegung im Netz beschreibt und Sollzeiten dafür nennt. Der Fahrplan besteht dazu aus der Sequenz der zu passierenden Streckenpunkte mit (für Blockpunkte optionalen) Sollzeiten für Ankunft und Abfahrt. Die Zeiten für die Blockpunkte sind im Rahmen der Diplomarbeit unbekannt und die Sollzeiten ergeben sich daher aus den geplanten Halten an Bahnhöfen. Das Modell verwendet aber auch die Sollzeiten an den Blockpunkten, wenn diese angegeben wurden. Darüber hinaus kann auch eine minimale Haltezeit angegeben werden, um z. B. Fahrgastwechsel zu realisieren.

Warteanweisungen dienen weiterhin zur Darstellung von Anschlussbeziehungen. So kann ein Zug die Anweisung bekommen mindestens eine bestimmte Zeit an einem Bahnhof auf einen anderen Zug zu warten. Warteanweisungen werden außerdem verwendet um Überholvorgänge zu veranlassen. Der so wartende Zug muss auf den anderen Zug warten, um diesem zuerst die Weiterfahrt auf der folgenden Strecke zu ermöglichen. Instanzen der Klasse WarteBranch existieren nur zur Laufzeit eines Simulationslaufes und speichern ggf. neue Warteanweisungen zwischen. War der Lauf „gut“, werden die Anweisungen permanent gespeichert, ansonsten verworfen (siehe Abbildung 4.6).

Nicht für jeden fahrenden Zug können - insbesondere im Rahmen dieser Arbeit - genaue Daten (Masse, Fahrleistung, usw.) zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde eine Möglichkeit geschaffen, Züge ähnlicher/gleicher Bauart zu Geschwindigkeitsprofilen zusammenzufassen (siehe Abbildung 4.3). Hauptbestandteil der entwickelten Geschwindigkeitsprofile sind Werte zur Beschleunigung, zur Leistung und zum Fahrwiderstand. Diese beschreiben die Eigenschaften eines Zugtyps auf einem bestimmten Streckentyp in einem bestimmten Geschwindigkeitsintervall. Die Zugtypen werden unterschieden, da diese je nach Triebfahrzeug und typischer Waggon-Konfiguration unterschiedliche Fahrleistungen aufweisen. Die Unterscheidung nach Streckentypen dient zur Darstellung der Einflüsse von z. B. Kurvenradius und Steigung auf den Fahrwiderstand. Außerdem kann so prinzipiell auch eine Unterscheidung zwischen Strecken mit und ohne Elektrifizierung erfolgen, sodass bestimmte Zugtypen nur auf bestimmten Strecken verkehren können.

4. Lösungsansatz

Da sich notwendige Leistung und Fahrwiderstand mit steigender Geschwindigkeit erhöhen (siehe Unterabschnitt 2.1.2) ist eine Einteilung in Geschwindigkeitsintervalle mit dann konstanten Werten gewählt worden. Die konstanten Werte vereinfachen die Berechnung und bieten je nach Größe der Intervalle entsprechende Genauigkeit.

Wie in Abbilung 4.3 zu sehen, gibt es zu jedem Zugtyp mindestens drei Geschwindigkeitsprofile. Es muss ein Profil ab Stillstand existieren. Weiterhin gibt es dann wenigstens das Profil, welches die Höchstgeschwindigkeit beschreibt, keine weitere Beschleunigung möglich macht und so das erste Geschwindigkeitsintervall nach oben schließt. Für jeden Zugtyp muss es außerdem ein Geschwindigkeitsprofil geben, welches die Beschleunigung für den Bremsvorgang angibt.

Zum Beispiel gibt es für einen Güterzug mindestens ein Profil mit 0 km/h und einer angenommenen durchschnittlichen Beschleunigung, ein Profil mit 100 km/h ohne Beschleunigung und ein Brems-Profil. Möchte man die Genauigkeit erhöhen, kann man z. B. ein weiteres Profil für 50 km/h hinzugefügt (und die Werte des ersten Intervalls entsprechend angepasst) werden. Die Geschwindigkeitsprofile werden außerdem

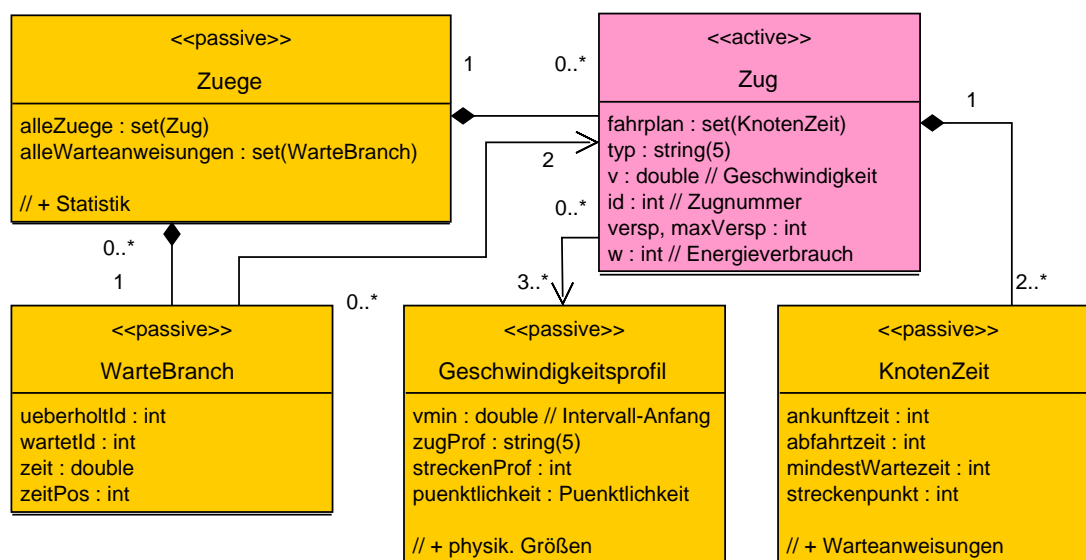


Abbildung 4.3.: Klassendiagramm: Zug, Fahrplan und Geschwindigkeitsprofile

durch das Attribut *puenktlichkeit* unterschieden. So kann eine mäßigere Fahrweise simuliert werden, wenn die Zeit zur Fahrt zum nächsten Streckenpunkt ausreichend ist. Das entspricht der Unterscheidung zwischen dem Fahren mit und ohne Reserve (siehe Unterabschnitt 2.1.7).

4.1.3. Fahrphysik

Für die Berechnung von Fahrzeit und Energieverbrauch auf einem gegebenen Streckenabschnitt ist es notwendig den Zugtyp, die aktuelle Geschwindigkeit des Zuges und die gewünschte oder gegebene Situation nach dem Abschnitt zu kennen (ist ein Stillstand notwendig, der Folgeabschnitt belegt, usw.). Die Berechnung kennt dann verschiedene Phasen einer Fahrt, um das gegebene Ziel zu erreichen. Am Anfang des Streckenabschnitts wird der Zug ggf. positiv beschleunigt oder abgebremst, um insgesamt möglichst nah an der vorgesehenen Fahrzeit zu bleiben. Die vorgesehene Fahrzeit ergibt sich aus den geplanten Zeiten aus dem Fahrplan bzw. aus den Belegungszeiten der zukünftig zu befahrenden Streckenabschnitte. Auf die Anpassung der Geschwindigkeit folgt ggf. eine Beharrungsphase bei konstanter Geschwindigkeit, wenn der Zug die notwendige oder maximale Geschwindigkeit erreicht hat. Zum Ende des Streckenabschnitts wird der Zug ggf. zum Stillstand gebremst, wenn ein Halt geplant ist. Die Reduzierung der Geschwindigkeit zum Anfang des Blockabschnitts, falls die Zeit ausreichend ist, dient der Minimierung des Energieverbrauchs (höhere Geschwindigkeit korreliert mit höherem Fahrwiderstand).

Die Beschleunigungsphase gliedert sich dabei in die relevanten Geschwindigkeitsin-

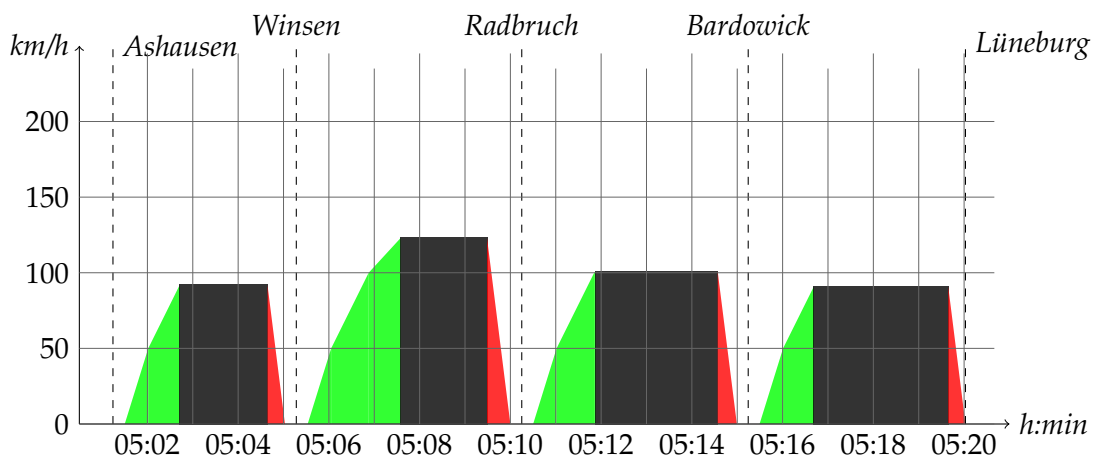


Abbildung 4.4.: Teil der berechneten Fahrt des ME 81601

tervalle. Die Berechnung eines solchen Beschleunigungs-Schrittes endet mit Erreichen des nächsthöheren Intervalls oder der berechneten Höchstgeschwindigkeit. Diese Höchstgeschwindigkeit unterscheidet sich dann teilweise zwischen den Streckenabschnitten, siehe Abbildung 4.4. Die dafür angenommene Beschleunigung unterscheidet sich beim Fahren mit oder ohne Reserve. Würde der Zug mit Reserve das Ende des Streckenabschnitts verspätet (z. B. mehr als eine Minute) erreichen, findet die Fahrt ohne Reserve, also mit höherer Beschleunigung, statt.

Da zum Zeitpunkt der Streckenbelegung innerhalb eines Simulationslaufs nicht

4. Lösungsansatz

ausreichend bekannt ist, wann die weiter folgenden Streckenabschnitte belegt sind (es findet keine aufwändige Vorberechnung statt), kann nicht immer die optimale Fahrweise berechnet werden. So ist es bspw. möglich, dass eine Beschleunigung zum Ende des Streckenabschnitts am sinnvollsten wäre, wenn im nächsten Abschnitt eine höhere Geschwindigkeit möglich ist. Ist der übernächste Abschnitt allerdings beim Erreichen belegt, wäre diese Fahrweise sinnlos. In Abbildung 4.5 ist beispielhaft zu sehen, wie ein Zug seine Geschwindigkeit nachträglich aufgrund eines folgenden belegten Abschnitts anpasst (jeweils ab Winsen und Radbruch). Zum Zeitpunkt der Beschleunigung war diese Belegung nicht klar/sicher, weshalb die anfangs zu hohe Geschwindigkeit zustande kommt. Nach Bardowick muss der Zug beschleunigen, um pünktlich Lüneburg zu erreichen. In der Berechnung des Beispiels wurde die Strecke jeweils 30 Sekunden vor und nach der eigentlichen Belegung blockiert. Daher folgt der ICE in einer Minute Abstand auf die jeweilige Ankunftszeit des ME am Ende des Blockabschnitts.

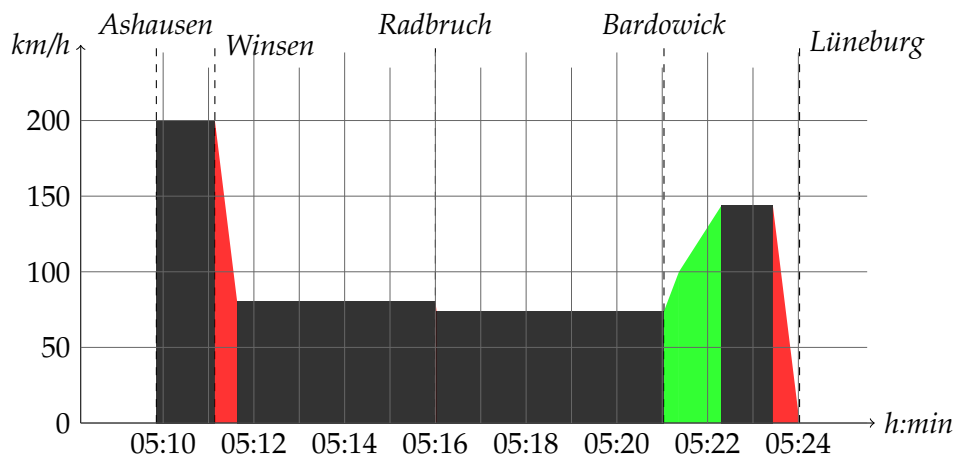


Abbildung 4.5.: Teil der berechneten Fahrt des ICE 581 (folgt ME 81601)

Der Energieverbrauch in der Beschleunigungsphase richtet sich nach der vorberechneten Fahrleistung für das jeweilige Geschwindigkeitsintervall.

t_a : Zeit mit Beschleunigung

a : Beschleunigung

v_0 : Geschwindigkeit aktuell

v_1 : Zielgeschwindigkeit

P_a : Leistung

W_a : Arbeit

$$t_a = \frac{v_1 - v_0}{a}$$

$$W_a = P_a * t_a$$

Der Energieverbrauch der Beharrungsphase ergibt sich aus dem Fahrwiderstand für das Geschwindigkeitsintervall.

t_v : Beharrungszeit
 F_w : Fahrwiderstand
 W_v : Arbeit

$$W_v = F * v_1 * t_v$$

Nicht abgebildet sind die (weiteren) Stufen zur Zugkraft und damit etwa auch das Ausrollen, bei dem die Zugkraft unter dem Fahrwiderstand liegt und die Geschwindigkeit langsamer abnimmt als bei einer Bremsung. Weiterhin hat bei der Berechnung des Energieverbrauchs die Rückgewinnung von Bremsenergie bislang keinen Einfluss. Das (für das Bremsen) zustände Geschwindigkeitsprofil könnte die Rückgewinnung aber prinzipiell als (negative) Leistung abbilden.

Zur Berechnung der notwendigen Geschwindigkeit über mehrere Blockabschnitte (nicht für jeden Blockpunkt müssen Sollzeiten angegeben werden), werden zuerst die Blockabschnitte für die Gesamtlänge zusammengefasst. Auf dieser Zusammenfassung wird die genannte Berechnung, jetzt jedoch ohne Berücksichtigung der blockweisen Geschwindigkeitsbeschränkungen, gestartet. Die Berechnung ergibt dann den üblichen Fahrtverlauf als Soll und damit die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit. Unter Angabe dieser Höchstgeschwindigkeit (und ob ohne oder mit Reserve gefahren werden muss) werden die folgenden Blockabschnitte einzeln berechnet. Wird eine Abweichung bei der blockweisen Berechnung erkannt, also die Beschleunigung vorher unterbrochen (Geschwindigkeitsbeschränkung auf Blockabschnitt oder Verbiegung), so startet ab diesem abweichenden Blockabschnitt die Gesamtberechnung für die Fortsetzung der Fahrt neu. Die Berechnung der Zielgeschwindigkeit findet sich in Anhang A.2.

Die notwendigen Sperrzeiten vor und nach der eigentlichen Fahrzeit wurden außerdem intern zum Ende jeder Fahrzeit addiert. So ergab sich prinzipiell eine verschobene Belegung (Sperrzeit beginnt direkt mit dem Befahren). Die Summe und der Einfluss der konstanten beschriebenen Sperrzeiten konnten so jedoch ebenso abgebildet werden, da z. B. die Sperrzeit zur Vorbereitung einer Fahrstraße nun für den folgenden Zug gilt. Dies funktioniert natürlich nur bei konstanten Sperrzeiten und nicht mehr bei Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

4. Lösungsansatz

4.1.4. Ablauf

Die wiederholte Ausführung des Modells ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Zu Beginn werden die Eingabedaten eingelesen, welche das Netz, die Züge, den Fahrplan und die Geschwindigkeitsprofile vorgeben. Weiterhin kann mit einem Satz an Warteanweisungen begonnen werden, um Anschlussbeziehungen darzustellen oder auch vorgegebene Überholvorgänge einzuleiten. Mit Ende eines Simulationslaufs wird der Lauf bewertet. Wurde der Lauf „erfolgreich“ anhand der Bewertungskriterien eingestuft, so werden die aus den Konflikten entstandenen weiteren Warteanweisungen exportiert. Wenn es noch nicht simulierte Warteanweisungen gibt, so werden die notwendigen Modellgrößen zurückgesetzt (Simulationszeit, berechnete Energieverbräuche, statistische Daten an Warteschlangen, usw.) und ein neuer Simulationslauf gestartet. Dabei wird immer eine Datei mit Warteanweisungen simuliert aus der ggf. weitere Dateien resultieren.

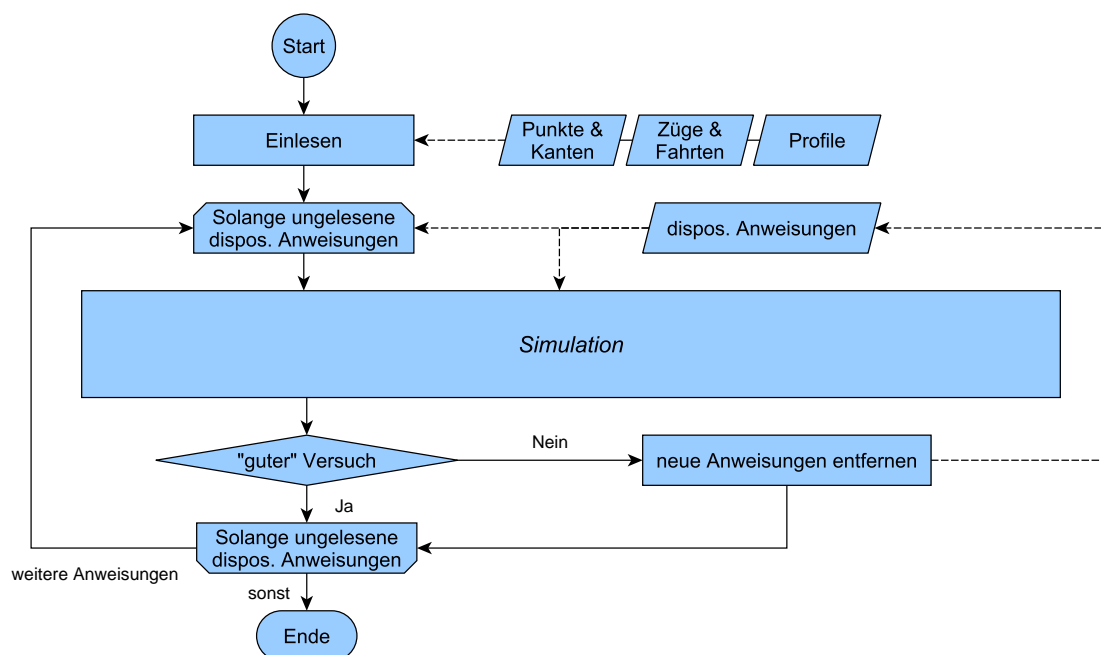


Abbildung 4.6.: Ablauf über Simulationsläufe hinweg

Der einzelne Simulationslauf läuft ereignisbasiert ab und ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Modellzeit beginnt bei 0, wobei in Sekunden (ab Mitternacht) gerechnet wird. Die Lebenszeit der Züge beginnt mit dem Start der Simulation, diese wechseln in den Zustand *Scheduled* und warten damit auf ihre erste geplante Ankunftszeit. Zu dieser Zeit werden sie aktiviert und versuchen den ersten geplanten Streckenpunkt zu belegen (und begeben sich damit in das Modellnetz). Dann wird versucht gemäß Fahrplan weiter zu fahren. Anhand der folgenden KnotenZeit-Instanz wird der folgende Strecken-

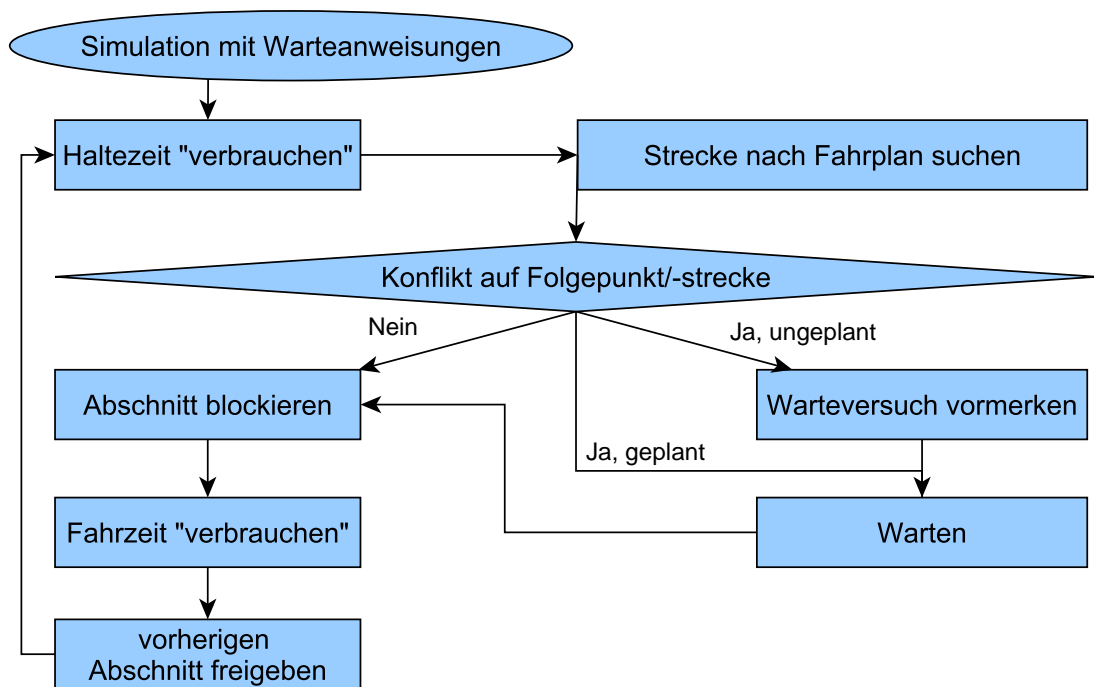


Abbildung 4.7.: Ablauf eines Simulationslaufs

punkt identifiziert und die Strecke die dort hin führt. Ist die Strecke frei, wird sie für den aktiven Zug reserviert und befahren. Für die (erste) Berechnung der Fahrzeit dient die geplante Ankunftszeit und ob der Zug einen geplanten Halt hat und demnach zum Stillstand kommen muss. Der Zug wechselt für die Dauer der Fahrzeit wieder in den Zustand *Scheduled* und gibt die Kontrolle ab. Ist nach Reaktivierung der auf den befahrenden Streckenabschnitt folgende Streckenabschnitt belegt, wird der Konflikt behandelt.

Nach Reaktivierung des Zugs kann dann erneut ein Konflikt bestehen, da der vorausfahrende Zug ggf. ebenfalls verbogen wurde oder ein am Bahnhof befindlicher Zug losgefahren ist. Der Vorgang wird wiederholt bis die Differenz der Fahrzeit unter 0,01 Sekunden liegt. Die Fahrzeit wird dann erneut um 0,01 Sekunden verlängert. Die Energieverbrauch und Geschwindigkeit sind dann minimal abweichend. Hier wird jedoch aufgerundet, da sonst die durch Ungenauigkeiten bei der Fließkomma-Arithmetik entstandenen zu kleinen Zeitschritte verwendet würden. Diese Zeitschritte (kleiner als 10^{-25}) können in SLX nicht bei der Berechnung der Modellzeit verwendet werden. Durch die Rundung wird dennoch sichergestellt, dass die Berechnung hinreichend genau ist. Zum Vergleich: Bei 200km/h werden in 0,01 Sekunden weniger als ein Meter zurückgelegt. Die im Modell verwendeten Zeiten zur Vorbereitung der Fahrstraße und die Durchrutsch- und Auflösezeit liegen bei 30 Sekunden bzw. 1 Minute.

4. Lösungsansatz

Konfliktbehandlung

Zur Behandlung eines Konflikts auf dem folgenden Abschnitt gehört die Neuberechnung der Fahrzeit auf dem aktuellen Abschnitt, diesmal mit der prognostizierten Belegungszeit des blockierenden Zuges (\rightarrow *Verbiegen*). Die Belegungszeit sorgt dann für die Konfliktlösung mit Verbiegen, da die Fahrzeit verlängert wird. Der aktive Zug gibt dann für die Differenz der berechneten Fahrzeiten erneut die Kontrolle ab. Weiterhin wird kontrolliert ob der blockierende Zug planmäßig vor dem wartenden Zug fahren soll (es existierte zuletzt eine Warteanweisung). Ist der Konflikt ungeplant, so wird eine neue Warteanweisung für den nächsten vor der Strecke mit Konflikt befindlichen Bahnhof mit mindestens zwei Gleisen vorgemerkt. Wird vor dem Konflikt-Abschnitt kein Bahnhof gemeinsam angefahren, so ist derzeit keine Konfliktlösung durch Überholen möglich. Der entstehende Baum aus Simulationsläufen ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es kann auch anders als dargestellt dazukommen, dass in Versuch A kein Konflikt B mehr auftritt, da sich Änderungen im vorherigen Ablauf ergeben haben. Dafür könnten ggf. neue Konflikte entstehen.

Da die Änderung des Ablaufs bereits in der Vergangenheit besteht (es muss vor dem eigentlichen Konflikt überholt werden), besteht überhaupt die Notwendigkeit für unabhängige Simulationsläufe. Eine rückwirkende Veränderung des Ablaufs wäre aufgrund der weiteren Auswirkungen zu komplex. Die Verwendung von Sicherungspunkten (Checkpoints) in SLX besteht auch nicht, da die auf einen Zeitpunkt zurücksetzbaren Objekte starken Einschränkungen unterliegen (z. B. keine Pointer bzw. Mengen).

Warteanweisungen

Die Warteanweisungen bieten in der derzeitigen Umsetzung die einzige Art des dispositiven Eingriffs und beschreiben damit die Unterschiede zwischen den Simulationsläufen. Sie dienen neben der Anordnung von Überholvorgängen auch der Darstellung von (gesicherten) Anschlussbeziehungen. Die Menge von Warteanweisungen für einen Simulationslauf ist um die Angabe einer Modellzeit ergänzt. Die Zeitangabe ergibt sich aus dem Zeitpunkt des für diesen Simulationslauf verantwortlichen Konflikts. In dem Simulationslauf, in welchem dieser generiert wurde, war dies die Abfahrtszeit des nun wartenden Zuges. Erst ab diesem Zeitpunkt können auftretende Konflikte für einen weiteren Simulationslauf Warteanweisungen hinzufügen. Die Einschränkung verhindert, dass bereits behandelte Konflikte weiterhin für neue Simulationsläufe sorgen können. Eine Warteanweisung selbst besteht aus folgenden Angaben:

- (a) Wartender Zug
- (b) Vorrangiger Zug
- (c) Punkt für Überholung
- (d) Wartezeit

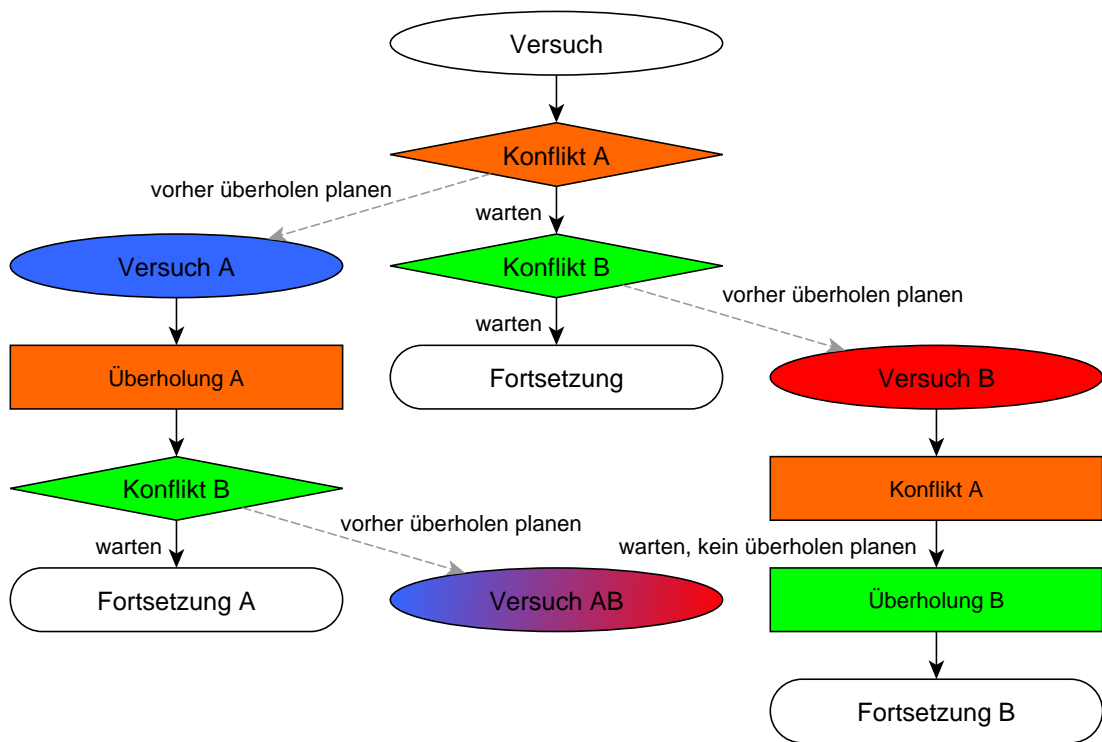


Abbildung 4.8.: Zusammenhang der Simulationsläufe

Ist die Wartezeit kleiner als Null, so wartet der Zug so lange, bis der vorrangige Zug den Bahnhof verlassen hat (Überholung). Ist eine sinnvolle Wartezeit angegeben, wartet der Zug so lange, bis der vorrangige Zug im Bahnhof gehalten hat oder die Wartezeit abgelaufen ist, je nachdem welches Ereignis zuerst eintritt (Anschlussbeziehung). Dies wird über einen *Fork* (siehe Unterabschnitt 2.3.4) sichergestellt, der die Lebenszeit der maximalen Wartezeit besitzt. Ist die maximale Wartezeit abgelaufen und der andere Zug noch nicht angekommen, wird der Zug vom Fork fortgesetzt. Trifft der Zug auf den gewartet wird vorher ein, aktiviert dieser den Zug und der Fork terminiert am Ende der Wartezeit ohne weitere Aktion.

4.1.5. Bewertungsfunktion

Ziel der Bewertungsfunktion ist die Ausgabe des „optimalen“ Simulationslaufs und der Ausschluss suboptimaler Simulationsläufe. Der Ausschluss dient dem Abbruch von Ästen im entstehenden Entscheidungsbaum, um die mit Anzahl von Zügen und Bahnhöfen ggf. exponentiell steigende Zahl von Simulationsläufen zu reduzieren. Wie in Unterabschnitt 4.1.4 vorgestellt, werden innerhalb eines Versuchs die Anweisungen für weitere Versuche gespeichert. Wenn am Ende der Simulation dieses Versuchs bekannt

4. Lösungsansatz

ist, dass dieser einen festzulegenden Abstand vom bisher bekannten (bzw. lokalen) Optimum besitzt, werden die aus dem Versuch gespeicherten Anweisungen für Alternativversuche nicht verfolgt.

Für die Simulation entscheidende Kriterien sind:

- (a) Energieverbrauch
- (b) Pünktlichkeit / Verspätung
- (c) Auslastung der Strecken und Bahnhöfe

Dabei untergliedert sich die Pünktlichkeit in die Pünktlichkeit der einzelnen Züge und die Pünktlichkeit der Gesamtmenge. Es kann z. B. sein, dass ein einzelner Zug mit einer Stunde Verspätung fährt und alle weiteren Züge dafür ohne (nennenswerte) Verspätung sind. Ein anderer Fall wäre die Verspätung aller Züge um ein bis fünf Minuten. Weiterhin können im Laufe einer Fahrt Verspätungen vorhanden sein, welche zum Ende der Fahrt mehr oder weniger ausgeglichen werden können. Auch solche Verspätungen müssen berücksichtigt werden, da sie z. B. Einfluss auf Anschlussbeziehungen haben können.

Da Energieverbrauch und Verspätung gegenläufige Zielgrößen sind, war es für die Bewertungsfunktion interessant die Kriterien unabhängig voneinander zu betrachten. So kann es unterschiedliche „optimale“ Lösungen für die Kriterien geben.¹

Unterschieden wird die energetisch optimale Lösung und die beste Lösung in Bezug auf die Pünktlichkeit. Die Metrik der Pünktlichkeit setzt sich aus der Summe aller zuletzt bekannten Verspätungen zusammen. Addiert werden die jeweils 1,5-fache maximale Verspätung unterwegs und maximale Verspätung eines einzelnen Zuges, um diese besonders zu gewichten. Die Auslastung der Ressourcen findet vorerst keine Betrachtung.

Bei der Auswertung der Bewertungsfunktion wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz war ein Vergleich der genannten Größen mit den bei der bisherigen Ausführung bekannten Bestwerten. Ab einer bestimmten Abweichung von diesen Bestwerten (z. B. fünf Prozent schlechter), wurde der Lauf als schlecht bewertet. Das Problem dieses Ansatzes ist die Art der Ausführung. Dabei verursachen die Konflikte während der Ausführung in der Reihenfolge des Auftretens neue Simulationsläufe. Jeder Simulationslauf bearbeitet außerdem nur Konflikte, welche in der Modellzeit nach der ursprünglichen Abfahrt am Überholungs-Punkt auftreten. Wenn nun also ein hoher Vorteil durch eine Überholung in späterer Modellzeit erlangt wird, so kann evtl. eine sukzessive Bearbeitung der auftretenden Konflikte als zu schlecht für eine weitere Betrachtung beurteilt werden. Ein zu hoher Toleranzbereich für Abweichungen vom

¹Beispiel: Die gleichmäßig langsame Fahrt eines Schnellzugs hinter einem Güterzug ist energetisch optimal, korreliert aber wahrscheinlich mit hoher Verspätung. Folgt der Zug einem oft haltenden Regionalzug und ist damit ggf. eine häufige Anpassung der Geschwindigkeit nötig (begrenzte Möglichkeiten vorausschauender Fahrweise, siehe Fahrphysik), sind Energieverbrauch **und** Verspätung höher.

bekannten Optimum erhöht die Anzahl an Simulationsläufen jedoch immens.

Der zweite Ansatz beschränkt sich auf die Verfolgung lokaler Minima. Dabei wird ein Simulationslauf nur weiter verfolgt, wenn er nicht schlechter als der erzeugende Simulationslauf war (ggf. in einem Toleranzbereich). Dies erlaubt auch die sukzessive Bearbeitung auftretender Konflikte. Ein Nachteil besteht allerdings im Verfolgen von lokalen Minima, die ggf. schon wesentlich schlechter als das bisherige Optimum sind. Für die Beurteilung der Simulationsläufe wurde nach experimenteller Bestimmung ein Mittelweg gewählt. Der aktuelle Lauf darf dabei nicht schlechter als der erzeugende Lauf sein. Weiterhin darf die bislang optimale Pünktlichkeit nicht über fünf Prozent besser und der Energieverbrauch nicht über drei Promille besser sein.

Die Größe der Toleranzbereiche ist schwierig zu bestimmen und vermutlich noch nicht optimal. Aufgrund der Art der Ausführung (jeweils nur eine Überholung zusätzlich pro Simulationslauf), kann es auf dem Weg zu einer optimalen Lösung über schlechter bewertete Simulationsläufe gehen. Als Beispiel seien zwei langsame Züge vor einem schnelleren Zug genannt. Mit einer ungeplanten Überholung des direkt vor dem schnellen Zug befindlichen Zuges erhöht sich dessen Energieverbrauch und Verspätung. Der schnelle Zug hat einen weiteren langsamen Zug vor sich und kann seine Fahrzeit deshalb nur wenig verringern. Erst mit Überholung dieses Zuges kann die Fahrzeit erheblich verringert werden.

4.2. Eingabedaten

Als Eingabeformat dienen Textdateien, welche zur besseren Lesbarkeit über Kopfzeilen zur Spaltenbeschriftung verfügen. Die Testdaten selbst stellen eine wichtige Voraussetzung für die Evaluation der Simulation und den Erhalt von aussagekräftigen Ergebnissen dar. Die Eingabedaten werden im Verzeichnis „input“ erwartet. Die Warteanweisungen, welche ausgegeben und eingelesen werden, werden in Unterabschnitt 4.1.4 erläutert und befinden sich im erzeugten Ausgabeverzeichnis. Eine Übersicht über die Ein- und Ausgabedateien ist in Abbildung 4.9 zu finden. Es wurde kein vorhandenes Datenmodell verwendet, sondern analog zu den Klassen Dateien entworfen. So sind z. B. in RailML die benötigten Entitäten für die Anwendung innerhalb der Arbeit auf verschiedene Entitäten innerhalb von RailML verteilt. Das manuelle Hinzufügen neuer Züge (z. B. Güterzüge) hätte dabei auch deutlich mehr Zeit beansprucht und nicht alle notwendigen Angaben (z. B. Fahrphysik) sind im RailML-Standard enthalten. Weiterhin sind etwa die eingeführten Warteanweisungen in ggf. hoher Anzahl zu speichern und einzulesen, sodass Datenminimierung an dieser Stelle wichtig ist.

4. Lösungsansatz

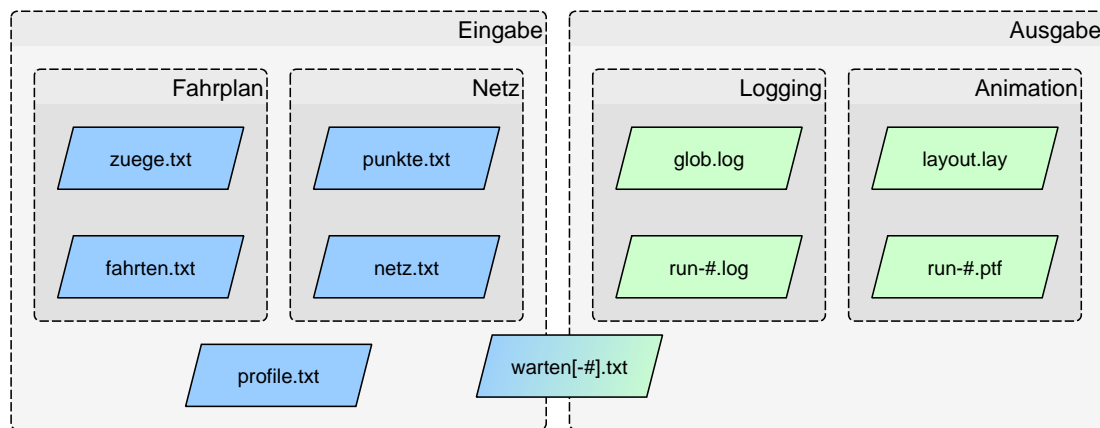


Abbildung 4.9.: Übersicht über die Ein- und Ausgabedateien

4.2.1. Zugprofile

Die für die Berechnung der Fahrphysik verwendeten Fahrprofile wurden aus FBS bereitgestellt.² Dazu wurden verschiedene Zugtypen mit Triebfahrzeug und Waggons zusammengestellt und an einer ausreichend großen Musterstrecke vorberechnet. Die vorberechneten Daten aus FBS beinhalten dann v-schrittweise Angaben zu Zugkraft, Fahrwiderstand, Beschleunigung, Leistung und daraus resultierend bisheriger Fahrzeit und Energieverbrauch (siehe Tabelle 4.1). In FBS konnten auch Angaben zu Fahrzeitreisen gemacht werden, um die Berechnung von Zugfahrten mit üblichen Reserven zu versehen (zum „Fahren mit Reserve“ siehe Unterabschnitt 2.1.7). Die genannten Größen (mit Ausnahme von Fahrzeit und von FBS berechnetem Energieverbrauch) blieben dabei jedoch unverändert, sodass eine einfache Übernahme der Fahrprofile mit Reserve nicht möglich war. Eine Berechnung mit der angegebenen Beschleunigung ergab daher weiterhin eine Fahrt ohne Reserve bzw. die Zugkräfte waren zu hoch. In der Tabelle sind die sich unterscheidenden Werte grau hinterlegt. FBS scheint den Energieverbrauch anhand der gelisteten Zugkraft über die Zeit zu berechnen. Da die Zugkraft laut FBS jedoch gleich bleibt (und auch die Beschleunigung, obwohl sich die gleiche Geschwindigkeit erst später einstellt), ergibt sich ein höherer Energieverbrauch bei eigentlich mäßigerer Fahrweise.

²FBS steht für Fahrplanbearbeitungssystem und wird entwickelt und vertrieben vom privatrechtlichen Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung, einer Ausgründung der TU Dresden. FBS besteht aus verschiedenen Programmen zur Eisenbahnbetriebsplanung, siehe auch <http://www.irfp.de>.

Aktion	bis km	Geschw.	Beschl.	Steigung	Fzt. (min)	Bst.	Fw (kN)	Fz (kN)	Pz (kW)	E (kWh)	r (m)
ein Beispiel-IC ohne Reserve											
Beschl.	0,000000	0,0	-1,1230	0,00	0,000	A	51,7	0,00	0	0,000	0
Beschl.	0,000063	1,0	0,6124	0,00	0,008		7,51	299,46	83	0,010	0
Beschl.	0,000252	2,0	0,6112	0,00	0,015		7,55	298,91	166	0,031	0
Beschl.	0,000569	3,0	0,6100	0,00	0,023		7,58	298,37	249	0,063	0
Beschl.	0,001012	4,0	0,6088	0,00	0,030		7,62	297,83	331	0,105	0
ein Beispiel-IC mit Reserve											
Beschl.	0,000000	0,0	-1,1230	0,00	0,000	A	51,7	0,00	0	0,000	0
Beschl.	0,000063	1,0	0,6124	0,00	0,008		7,51	299,46	83	0,011	0
Beschl.	0,000063	2,0	0,6112	0,00	0,016		7,55	298,91	166	0,033	0
Beschl.	0,000569	3,0	0,6100	0,00	0,024		7,58	298,37	249	0,065	0
Beschl.	0,001012	4,0	0,6088	0,00	0,032		7,62	297,83	331	0,109	0

Fzt. Fahrzeit

Bst. Betriebsstelle

Fw Fahrwiderstand

Fz Zugkraft

Pz Zugleistung

r Radius der Strecke

Tabelle 4.1.: Beispiel aus FBS-Export: ein IC mit und ohne Reserve

Aus den vorberechneten Werten für Fahrwiderstand, Beschleunigung usw. wurden dann Mittelwerte für die gewählten Geschwindigkeitsintervalle berechnet. Die sich ergebenden Fahrprofile befinden sich in der Datei profile.txt. Zur Übernahme der FBS-Daten mit Reserve wurden die Energieverbräuche mittels neu berechneter Zugkräfte korrigiert.

 a_m : Beschleunigung mit Reserve a_o : Beschleunigung ohne Reserve F_w : Fahrwiderstand F_{am} : Kraft für Beschleunigung mit Reserve F_{ao} : Kraft für Beschleunigung ohne Reserve F_{zm} : Zugkraft mit Reserve F_{zo} : Zugkraft ohne Reserve

$$F_{am} = \frac{a_m}{a_o} * F_{ao}$$

$$\rightarrow F_{zm} = \frac{a_m}{a_o} * (F_{zo} - F_w) + F_w$$

Die Beschleunigung mit Reserve ergab sich entgegen der FBS-Ausgabe trivialerweise aus Strecke und Zeit.

4. Lösungsansatz

4.2.2. Netz

Als wichtigster Abschnitt des Testnetzes wurde die Strecke Hamburg-Harburg nach Celle über Lüneburg gewählt, diese ist auch Teil der Kursbuch-Strecke 110 der Deutschen Bahn und führt dort weiter nach Hannover. An der Strecke liegt auch Maschen, der dort befindliche Rangierbahnhof ist ein wichtiger Umschlagplatz für Güterzüge. Diese Züge machen deshalb auch einen großen Teil des Verkehrs auf der Strecke aus. Die Belastung durch Güterzüge und Personenverkehr ist insbesondere auf dem Abschnitt Hamburg-Harburg bis Celle hoch. Deshalb war und ist die Strecke auch Teil von vielen Studien und von Vorhaben zum Ausbau der Infrastruktur (siehe z. B. [29], [8] und [30]). Das Netz wurde weiterhin in Richtung Hamburg-Wilhelmsburg erweitert. Der Bahnhof liegt auf der Strecke Hamburg-Hauptbahnhof nach Hamburg-Harburg und erlaubt damit Zügen, welche den Bahnhof Harburg durchfahren, eine gewisse Geschwindigkeit vor der folgenden Strecke aufzunehmen. Das ist nötig, da derzeit die Geschwindigkeit der Züge zum Startzeitpunkt nicht angegeben werden kann. Die Züge starten im Stillstand, alle folgenden Geschwindigkeiten werden stets berechnet.

Die zur Beschreibung des Netzes notwendige Aufteilung in Blockpunkte wurde nur Anhand ihrer Anzahl geschätzt, da keine aktuellen Daten gefunden werden konnten.³ Die Dateien, welche das Netz beinhalten sind *punkte.txt* und *netz.txt*. In der Punkte-Datei sind alle Streckenpunkte enthalten mit den Angaben *Id*, *Gleise* und *Name*. Ist die Gleisangabe negativ, handelt es sich um einen Blockpunkt. Bei positiven Gleisangaben wird ein Bahnhof angenommen. Der Name dient lediglich der Ausgabe. In der Netz-Datei sind zu jeder Strecke die Angaben *Von-Id*, *Nach-Id*, *Strecken-Profil*, *Strecken-Länge*, *Name* und *Höchstgeschwindigkeit* enthalten. *Von-Id* und *Nach-Id* verweisen dabei auf Streckenpunkte der Punkte-Datei, welche bereits vorher eingelesen wurden. *Strecken-Profil* ist ein Teil des Schlüssels zum Geschwindigkeitsprofil und dient zusammen mit der *Strecken-Länge* sowieso der *Höchstgeschwindigkeit* zur Berechnung der Fahrzeit wie in Unterabschnitt 4.1.3 erläutert.

4.2.3. Fahrplan

Die Dateien *zuege.txt* und *fahrten.txt* beschreiben den Fahrplan. In der Züge-Datei sind alle Züge, welche in der Simulation berechnet werden sollen enthalten. Die dazugehörigen Spalten sind *Zug-Id* und *Typ*. Die *Zug-Id* entspricht falls vorhanden der Zugnummer, welche im Kursbuch-Fahrplan verwendet wird. Der *Typ* beschreibt die Zugklasse des Zuges zur Berechnung der Fahrzeit und wird bei der Ausgabe mit geschrieben (typischerweise *RE*, *ICE* usw.). In der Fahrten-Datei befindet sich der eigentliche Fahrplan. Dazu gibt es die Angaben *Zug-Id*, *Punkt*, *Ankunftszeit*, *Abfahrtszeit* und *Mindestwartezeit*. Die *Zug-Id* ist Fremdschlüssel auf die Züge-Datei und muss dort bereits definiert sein, um den Zug-Typ zu kennen. Da nicht alle Angaben über *Ankunftszeit* und *Abfahrts-*

³Die auf <http://www.klauserbeck.de/Kilometrierung/Tabelle8/Hannover/HannoverCuxhaven8.8.1/Hannover8.8.1.htm> zu findende Kilometrierung ist seit der Verkleinerung der Blockabschnitte leider nicht mehr aktuell.

zeit verfügen (bei Blockpunkten ggf. unbekannt), müssen die Zeilen eines Zuges in der korrekten Reihenfolge in der Datei stehen. Die Schlüssigkeit der Angaben zum Punkt (theoretisch Fremdschlüssel auf Streckenpunkt) und den Zeiten wird jedoch erst bei der Ausführung der Fahrt überprüft. So kann es ggf. zwischen den sequentiell genannten Punkten überhaupt keine Strecke geben oder diese Strecke nicht vom Zug-Typ befahrbar sein.

Der Fahrplan basiert auf dem Kursbuch-Fahrplan der Deutschen Bahn (Stand 16.12.2013) zu der genannten Kursbuchstrecke auf [5]. Zusätzlich wurden Güterzüge eingepflegt, welche ebenfalls auf der Strecke verkehren. Da der Fahrplan für Güterzüge nicht ohne weiteres zugänglich ist, wurden diese per Hand eingetragen. Dazu wurde zuerst der Fahrplan ohne Güterzüge simuliert und anschließend mittels ausgegebenem Zeit-Weg-Diagramm Lücken abgeschätzt. Die Anzahl und Verteilung über den Tagesverlauf orientiert sich grob an den Zählungen aus [29]. Für den dort beschriebenen Erzzug gab es kein Fahrprofil. Deshalb wurde eine Kopie des Modell-Güterzugs auf 80km/h beschränkt, um wenigstens die langsamere Zugfahrt zu simulieren. Die Anzahl der Güterzüge wurde allerdings vorerst auf 32 (zum Vergleich: 110 Personenzüge) beschränkt, dies hatte bereits erhebliche Auswirkungen auf die Laufzeit und machte Anpassungen an der Bewertungsfunktion notwendig.

Es wurden keine Anschlussbeziehungen oder geplante Überholungen abgebildet, da diese nur eingeschränkt bekannt waren. Weiterhin fehlte die Kenntnis über geplante Durchfahrtzeiten der Züge, da diese nicht im Kursbuch-Fahrplan enthalten sind. Züge, welche keinen geplanten Halt mehr im modellierten Netz hatten, wurden ohne Zeitangaben bis Celle beschrieben, da dort der Abzweig in Richtung Hannover folgt.

4.3. Ausgabedaten

Die Ausgabe der Simulationsläufe unterteilt sich in je eine lesbare Textdatei mit den gefahrenen Zeiten der Züge, einer globalen Textdatei zum Vergleich der Simulationsläufe und die Ausgabe zur Darstellung des jeweiligen Bildfahrplans mittels *Proof Animation*. Die Ausgaben befinden sich im beim Start der Simulation erzeugten Unterverzeichnis, dessen Name sich aus Datum und Uhrzeit zusammensetzt. Die Übersicht über alle Dateien ist wie bei den Eingabedaten in Abbildung 4.9.

4.3.1. Logging

Die Textdatei, welche von jedem Simulationslauf erzeugt wird (run-#.log, wobei # der Nummer des Simulationslaufs entspricht), enthält die tatsächlichen und geplanten Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den Streckenpunkten. Die sekundengenaue Ausgabe ermöglicht eine Prüfung der Plausibilität der Fahrzeiten und Zeitabstände der Züge. Weiterhin wird ausgegeben ob ein Zug vor einem Streckenpunkt bremsen musste und was der Grund war (geplanter Halt oder Warten auf Züge).

Weiterhin wird eine Textdatei über alle Simulationsläufe erstellt (glob.log). Diese ent-

4. Lösungsansatz

hält eine tabellarische Übersicht von Verspätungen und Energieverbrauch aller Züge inkl. Zusammenfassung (Spalten) über die Simulationsläufe (Zeilen) hinweg. Der Überblick lässt sich auch der zum jeweiligen Ausführungszeitpunkt bekannte optimale Lauf entnehmen und welche weiteren Simulationsläufe aus dem aktuellen Lauf resultierten.

4.3.2. Proof Animation

Die Ausgabe für *Proof Animation* gliedert sich in eine über alle Läufe identische Layout-Datei (layout.lay) und für die Simulationsläufe spezifische Trace-Dateien (trace-#.ptf, wobei # der Nummer des Simulationslaufs entspricht). Die Layout-Datei enthält das Grundgerüst zur Darstellung des Bildfahrplans. Im oberen Teil des dargestellten Layouts ist ein anhand des eingelesenen Netzes erzeugter maßstabsgetreuer vereinfachter Spurplan (1 km entspricht 4 Einheiten) enthalten. neben den Elementen des Spurplans befinden sich Graphen vom Typ *Bar*. Diese stellen später die Auslastung der Netzelemente dar und können so ggf. Engpässe illustrieren. Die Gleise der Bahnhöfe sind weiterhin angedeutet, indem bis zum gewissen Grad (bis zu zehn) parallele Linien am Streckenpunkt eingezeichnet werden.

Unter dem Spurplan ist das Zeit-Weg-Diagramm vorbereitet. Dazu dient ein Graph vom Typ *Plot*. Ein Plot vereinfacht die spätere Darstellung der Zeit-Weg-Linien und bietet die Möglichkeit ein Raster (z. B. für halbe Stunden) einzublenden. Der Graph ist für einen ganzen Tag vorbereitet und geht von 0 bis 24 Uhr. Der eigentliche Betriebstag geht über diesen Zeitpunkt hinaus, allerdings kann der Zeitraum mit einfachen Mitteln erweitert oder begrenzt werden. In Abbildung 4.10 ist ein Teil des berechneten Spurplans über dem Zeit-Weg-Diagramm dargestellt (Abbildung A.1 im Anhang zeigt die komplette Ansicht).

Die eigentliche Darstellung eines Simulationslaufs ist in einer Trace-Datei enthalten. Die Trace-Dateien verfügen über die Zeit-Weg-Linien der Züge, welche durchnummeriert sind. Die Nummerierung ermöglicht es, bereits gezeichnete Linien durch Linien mit gleicher Nummer zu überschreiben. Proof Animation stellt dann die jeweils zuletzt beschriebene Linie dar. Das Verhalten hilft bei der (ggf. mehrmaligen) Änderung des Fahrverhaltens auf einem Streckenabschnitt im Konfliktfall. Durch Farbcodierung ist die jeweilige Phase der Fahrt zu erkennen (in Unterabschnitt 4.1.3 erläutert):

- grün ● Beschleunigen
- schwarz ● Beharren
- rot ● Bremsen

In Abbildung 4.11 ist ein Beispiel einer solchen Ausgabe zu sehen. Dort ist auch die Sperrzeit des jeweiligen Streckenabschnitts durch horizontale graue (●) Linien dargestellt. Zu erkennen ist der Abstand der eigentlich Zeit-Weg-Linie zur Sperrzeit, da so die jeweiligen Zeiten vor Belegung (Fahrstraßenbildezeit, Sichtzeit u.a.) und nach Durchfahrt (Räumfahrzeit u.a.) abgebildet sind. Für eine detaillierte Erläuterung der Sperrzeiten siehe Unterabschnitt 4.1.4.

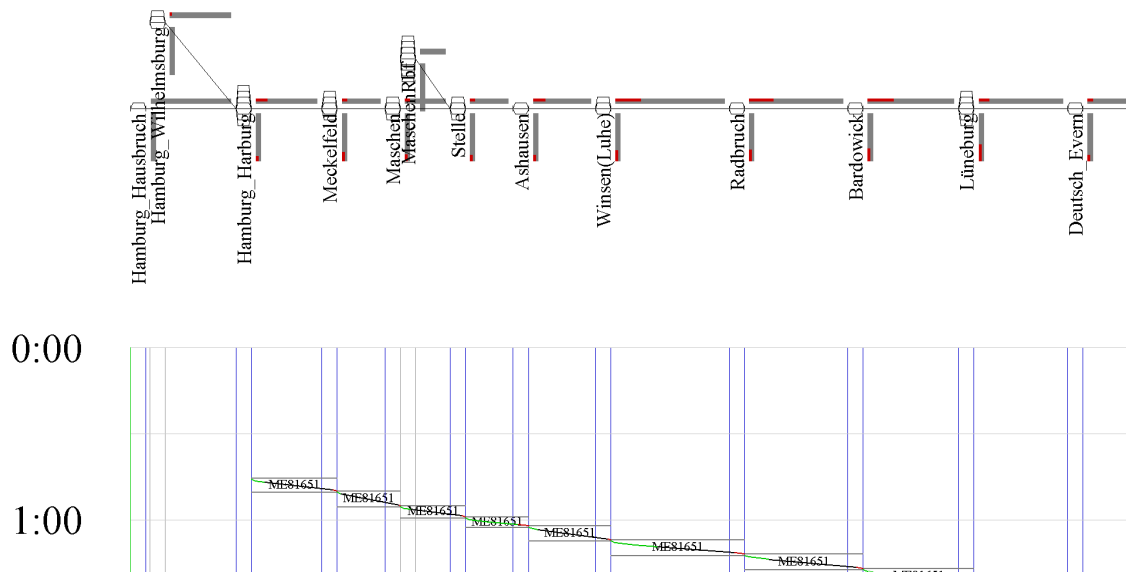


Abbildung 4.10.: Proof Animation: Spurplan mit Diagramm

Dargestellt ist der Metronom mit der Zugnummer 81606 zwischen Ashausen und Winsen (Luhe). Der Zug hält an beiden Bahnhöfen, daher beginnt die Fahrt mit einer Beschleunigung. Wenn die Geschwindigkeit ausreicht um pünktlich anzukommen, beharrt der Zug bei dieser Geschwindigkeit und bremst dann in Winsen. Zu sehen sind die unterschiedlichen Steigungen der Zeit-Weg-Linie, da z. B. anfangs das Geschwindigkeitsintervall während der Beschleunigung wechselt. Die weitere Beschleunigung verläuft „flacher“, da die durchschnittliche Geschwindigkeit dann höher ist. Die blauen (•) senkrechten Linien verbinden den Spurplan mit den Netzelementen und begrenzen so in dem Beispiel die beiden Bahnhöfe (die rechten Linien zeigen Anfang und Ende von Winsen). Die vom geraden Spurplanverlauf abweichenden Streckenpunkte werden, wie in Abbildung 4.10 angedeutet, zur Unterscheidung durch graue Linien dargestellt. Die obere hellgraue (•) Linie steht für 5 Uhr (laut Protokoll ist die Abfahrtszeit in Ashausen 5:01 Uhr und 30 Sekunden).

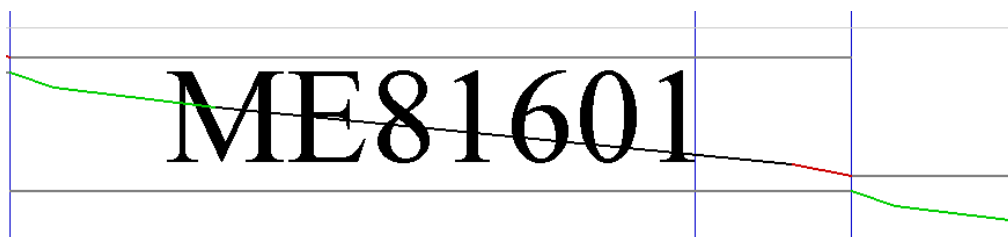


Abbildung 4.11.: Proof Animation: Zeit-Weg-Linie mit Sperrzeit

4. Lösungsansatz

Auf die Möglichkeiten der Animation, also die Einbindung der Modellzeit als Grundlage zur Darstellung der Fahrten, wurde verzichtet. Die Zeit-Achse des Zeit-Weg-Diagramms bietet die in dieser Domäne üblichere Art der Darstellung von Fahr- und Haltezeiten.

4.4. Bemerkungen zu SLX

Bei der Verwendung von SLX musste z. B. die Freigabe von Speicher gesondert beachtet werden, da Variablen erst mit SLX 3 (noch im Test) nur innerhalb ihres Programmblocks gültig sind. So wird zur Vorberechnung der notwendigen Geschwindigkeit über mehrere Streckenabschnitte (siehe Unterabschnitt 4.1.3) eine virtuelle Strecke als Zusammenfassung erstellt. Diese Strecke ist temporär innerhalb der aufrufenden Methode und kann nach der Berechnung eigentlich verworfen werden. Die Ausführung der Simulation hatte jedoch mit Einführung der virtuellen Strecke einen steigenden Speicherbedarf, ein eigentlich unnötiger Aufruf von `destroy` auf dieser Strecke erledigte das Problem. Die Verweise auf die Strecke wurden durch das Ende der Methode bzw. durch erneuten Aufruf der Methode ja prinzipiell ungültig, sodass SLX die Instanzen selbst hätte entfernen müssen.

Da weitere Dateien in SLX per `include` (analog zu C) hinzugefügt werden können und Zyklen des Datei-Imports nicht erlaubt sind, kann der Erfolg der Übersetzung mit SLX weiterhin davon abhängen, welche Datei aktuell angezeigt wird. Diese Datei scheint der Startpunkt des Übersetzungs-Prozesses zu sein. Die korrekte Reihenfolge der Definition von Klassen und Methoden ist deshalb vom korrekten Startpunkt abhängig (siehe Unterabschnitt 2.3.4). Ergeben sich bei der Modularisierung des Simulationsmodells wie in diesem Modell starke Abhängigkeiten zwischen den Modulen, wird eine Auflösung dieser Abhängigkeiten zunehmend schwierig.

Ein immenser Vorteil von SLX ergab sich aus der Möglichkeit das Laufzeitverhalten während einer Simulation zu überwachen. Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere das Schreiben der Protokolldateien einen hohen Anteil an der Ausführungszeit hatte. Darin begründet sich die Einführung der Zwischenspeicherung für weitere Warteanweisungen bis zur endgültigen Ausgabe. In vorherigen Versionen wurden die Dateien sofort geschrieben und dann ggf. von weiteren Anweisungen überschrieben. Allein dadurch ergab sich ein Laufzeitunterschied bei sonst unveränderten Voraussetzungen von etwa 40 Prozent.

5. Auswertung

Dieses Kapitel enthält die Auswertung der durch die Ausführung der Simulation mit den Testdaten erlangten Erkenntnisse. Das Simulationsmodell wurde dafür mit den in Abschnitt 4.2 genannten Testdaten ausgeführt. Im folgenden Abschnitt 5.1 werden die Simulationsergebnisse analysiert. Dazu gehört auch der Vergleich verschiedener Dispositions-Szenarien, welche durch die Simulation entworfen wurden. Weiterhin werden die von der Simulation vorgeschlagenen optimalen Ergebnisse bewertet. Abschnitt 5.3 enthält dann allgemeine Rückschlüsse auf das Simulationsmodell und dessen Laufzeitverhalten und Speicherverbrauch (flüchtig und permanent). Aufgrund der Rückschlüsse und der bekannten Schwachstellen ergibt sich dann in Abschnitt 5.3 ein möglicher Ausblick auf Erweiterungen oder Verbesserungen.

5.1. Bewertung der Simulationsergebnisse

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse dient die Textdatei glob.log. Die Datei gibt für den ersten Simulationslauf (also alle Konflikte durch Verbiegen lösen) einen Gesamtenergieverbrauch von $265,043\text{MWh}$ an. Zum Vergleich: Der von FBS berechnete Energieverbrauch des verwendeten RE-Modellzuges lag auf 100km mit sechs Beschleunigungs- und Bremsvorgängen bei $1,585\text{MWh}$, der des Güterzuges bei $4,562\text{MWh}$ (jeweils ohne Reserve). Der durch Simulation berechnete Wert erscheint also aufgrund der gefahrenen Strecke von etwa 70 bis 130km (manche Fahrten nur bis oder ab Uelzen) und insgesamt 142 Zügen plausibel.

Die Summe der Verspätung wurde mit 11012 Sekunden, also etwa 184 Minuten angegeben. Die maximale Verspätung eines Zuges und die maximale Verspätung zwischendurch lag bei 1327 Sekunden (etwa 22 Minuten). Die Verspätungen haben sich dabei nicht gleichmäßig auf alle Züge verteilt, sondern wurden von wenigen getragen. Dabei fällt auf, dass insbesondere die Fahrten der IC verspätet wurden (zwischen 450 Sekunden und dem Maximalwert). Alle anderen Züge konnten mit keiner bis etwa einer Minute Verspätung fahren und hatten unterwegs höchstens drei Minuten. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die ICE- und Güterzüge zum Streckenende hin oft keine Zeitangaben mehr im Fahrplan hatten, sodass Verspätungen nicht messbar waren. Lediglich zu den weitestgehend konfliktfreien Morgenstunden halten ICE in Lüneburg. Eine Ergänzung der Eingabedaten würde eine sinnvollere Messung und Optimierung ermöglichen.

5.1. Bewertung der Simulationsergebnisse

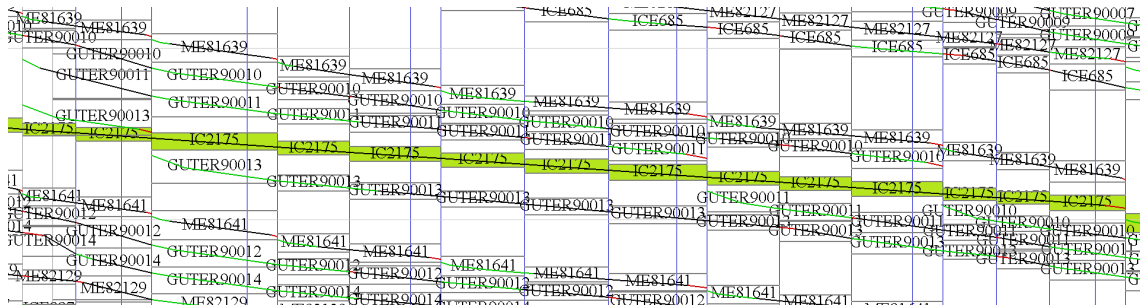


Abbildung 5.2.: IC 2175 im Simulationslauf mit der geringsten Verspätung

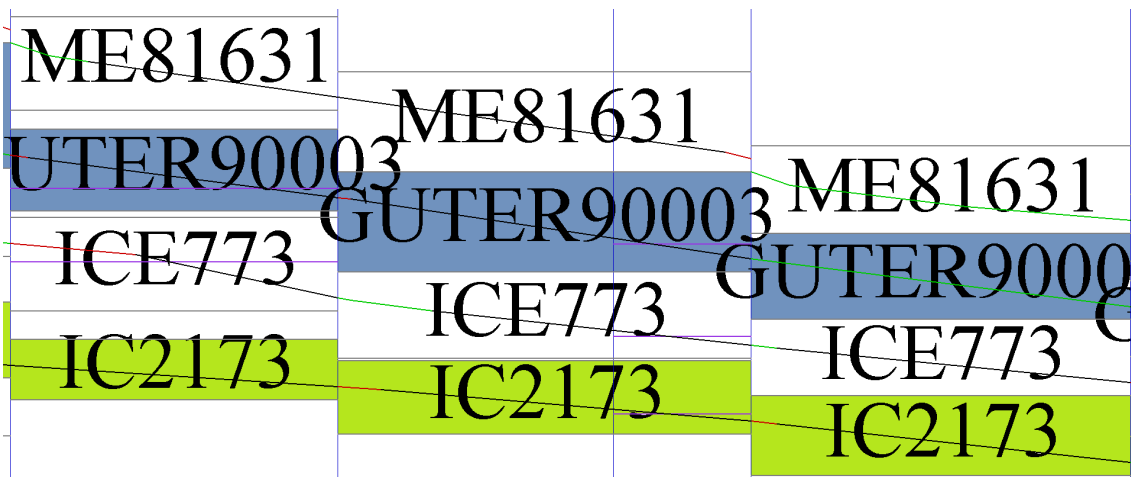


Abbildung 5.3.: IC 2173 bei Winsen (Luhe) (ohne Überholung)

Der IC (grün) fährt hinter dem ICE 773, welcher einem langsamen Güterzug folgt. Der Güterzug (blau) ist von einem häufiger haltenden Metronom ausgebremst. Der Metronom fährt nur bis Lüneburg, die Fahrt der weiteren Züge setzt sich bis über Uelzen hinweg fort (siehe Abbildung 5.4). Dort setzt der Metronom mit Fahrtnummer 82841 (rosa) ein und ist (mit allerdings weniger Halten) vor den Zügen.

Als Beispiel für einen für den IC günstigeren Simulationslauf sei nun die Überholung des Metronoms durch den Güterzug in Meckelfeld genannt. Durch die verlängerte Haltezeit hat der Metronom nun kurzzeitig eine Verspätung von 424 Sekunden, die er bis auf eine Minute wieder herausfahren kann. Da jeweils nur ein Überholvorgang durchgeführt wird, „hängen“ die Schnellzüge nun hinter dem Metronom, der bis Lüneburg keine schnellere Fahrt möglich macht. Weiterhin ergibt sich bei der weiteren Fahrt ein neues Problem durch den nun schnelleren Güterzug. Dieser ist vor der geplanten Abfahrt des einsetzenden Metronoms in Uelzen und verzögert diesen nun (siehe Abbildung 5.5).

5. Auswertung

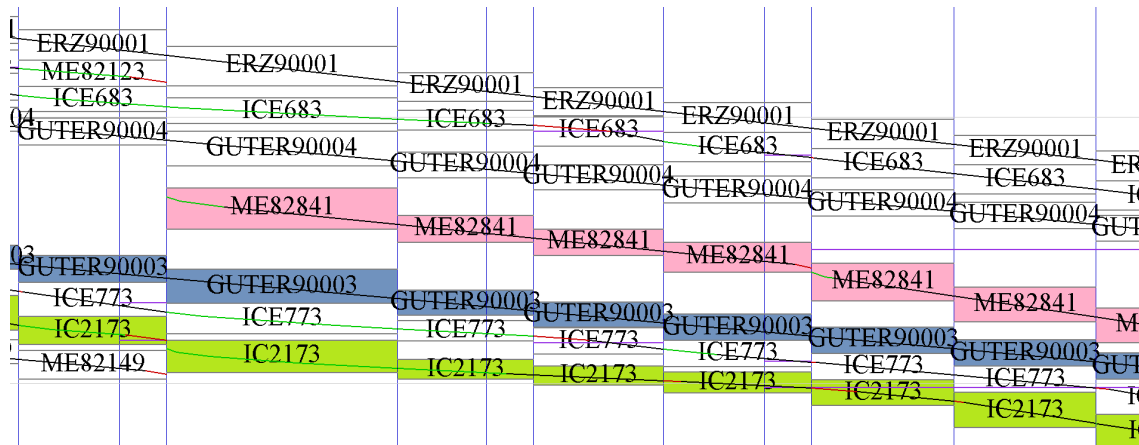


Abbildung 5.4.: IC 2173 ab Uelzen mit ME 82841 (ohne Überholung)

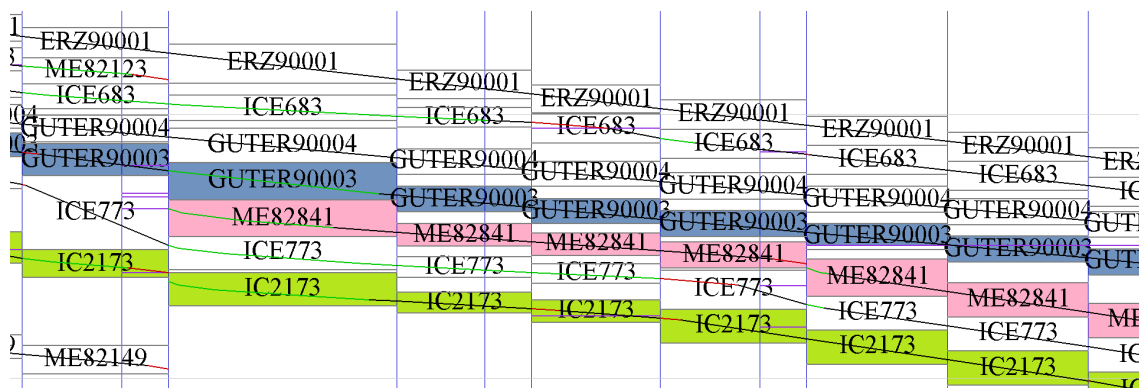


Abbildung 5.5.: IC 2173 ab Uelzen mit ME 82841 (mit Überholung)

Durch den eingeleiteten Überholvorgang hat sich nun also nicht nur die Fahrt des per Anweisung überholten Metronoms verspätet, sondern auch die Fahrt des in Uelzen einsetzenden Metronoms. Weiterhin haben die folgenden Schnellzüge lediglich einen geringen Vorteil, da sie sich jeweils hinter die verspäteten Metronome einordnen müssen. Dadurch wird das Gesamtergebnis dieses Simulationslaufs insgesamt ungünstig (10713 Sekunden Verspätung, 256,520MWh Energieverbrauch). Der im Gegensatz zum ersten Simulationslauf verschlechterte Energieverbrauch sorgt nun für einen Abbruch, auch wenn weitere Überholungen eine deutliche Verbesserung hätten bringen können. Sinnvoll wäre z. B. eine Überholung des Erzzuges, welcher in Uelzen für die hohe Zugdicke mit verantwortlich ist (der erste Konflikt mit dem Erzzug findet zeitlich erst nach der angewiesenen Überholung statt, wäre also in diesem Simulationslauf angewiesen worden).

Das Ergebnis der Simulation zeigt also, dass die Optimierung in Bezug auf Verspätungen nicht vollständig funktioniert. Der zeitlich beste Simulationslauf hat immer noch Verspätungen von in Summe 6455 Sekunden (zu vorher 11012 Sekunden) durch die beschriebenen Probleme und weist nur 10 Überholvorgänge aus (davon acht zu Gunsten von IC und allein vier zu Gunsten des IC 2175).

5.1.2. Reduktion des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch im energetisch optimalen Simulationslauf wird mit 254,873 MWh angegeben und ergibt sich dort durch lediglich vier Überholungen. Der geringe Vorteil im Gegensatz zum ursprünglichen Simulationslauf resultiert aus Überholungen von häufig haltenden Zügen. Der Grund für die minimale Optimierung liegt hauptsächlich bei den beschriebenen Problemen mit der vorausschauenden Fahrweise. Die Züge fahren lediglich nicht schneller als zur Einhaltung ihres Fahrplans nötig, ein Verbiegen aufgrund einer Blocklegung findet allerdings erst beim Befahren des vorherigen Blocks statt. Wenn nun ein Zug durch eine Überholung frühzeitig freie Fahrt und keine weitere Angabe für eine Durchfahrzeit besitzt, so fährt er mit der Höchstgeschwindigkeit und verbraucht somit deutlich mehr Energie als bei der verbogenen Fahrweise. Eine Optimierung des Energieverbrauchs ist somit wenig effektiv. Mit einem vollständigeren Fahrplan würden sich ggf. völlig andere Ergebnisse einstellen, da dann häufiger eine vorausschauende Fahrweise möglich wäre und erst Verspätungen zu straffer Fahrweise und damit höherem Energieverbrauch führten.

5.1.3. Analyse der Streckenauslastung

Die Ausgabe der Strecken- und Streckenpunktauslastung hat nur unbefriedigende Ergebnisse gebracht. In Abbildung 5.6 ist ein Ausschnitt des ersten Simulationslaufs zu sehen. Die Balken beschreiben die prozentuale Auslastung über den gesamten Kalendertag, die waagerechten Balken betreffen die Strecke und die senkrechten Balken die Streckenpunkte. Zu erkennen ist eine deutlich zunehmende Auslastung in Stelle und Ashausen nach der Einfädelung des Güterverkehrs vom Rangierbahnhof Maschen. Allerdings lässt sich selbst hier keine Aussage über eine mögliche Überlastung der betroffenen Streckenabschnitte treffen. Die prinzipielle Kapazität über den Tagesverlauf wäre deutlich größer, da insbesondere die Morgenstunden noch ohne dichte Zugfolge sind. Eine sinnvolle Anreicherung der Daten wäre die Ausgabe der Anzahl von Konflikten bzw. der Zeiten, die durch Verbiegen gewartet werden musste. Diese statistischen Daten sind leider derzeit in den GPSS-Klassen von SLX nicht verfügbar. Dort werden nur die Zeitintervalle erhoben, zu welchen die Belegungselemente frei und/oder verfügbar waren. Zur Erhebung dieser Daten müssten die entsprechenden Klassen erweitert oder eine eigene Statistik geführt werden.

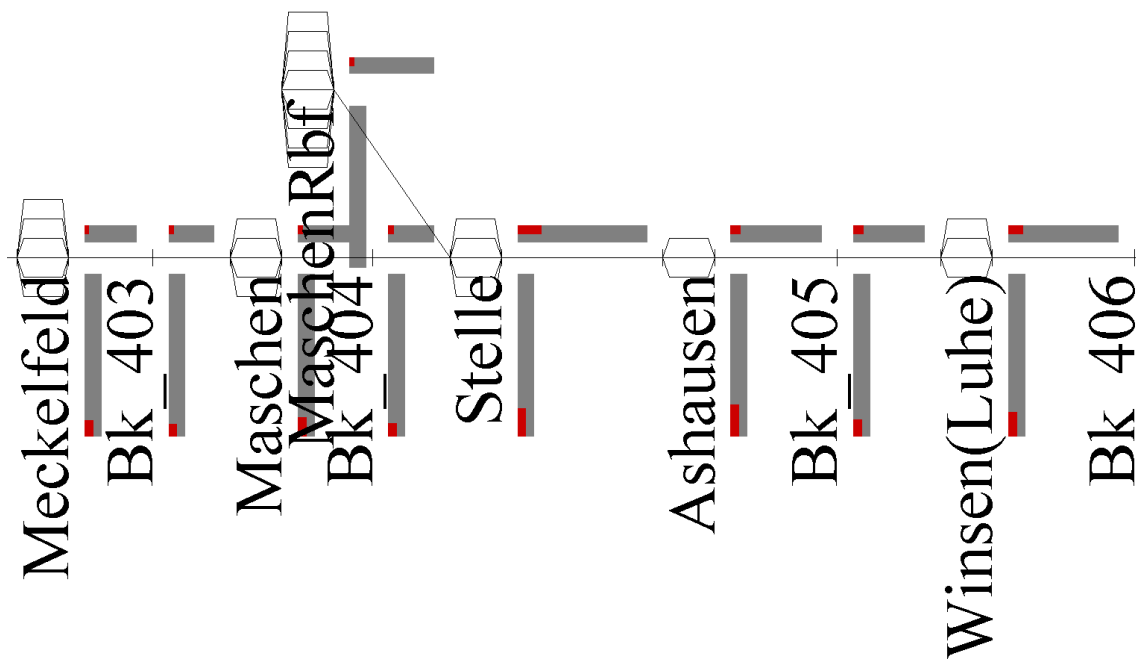


Abbildung 5.6.: Ausgabe Spurplan mit Auslastungen

5.2. Bewertung des Simulationsmodells

Die durchgeführte Simulation war erst nach etwa 3 Stunden und 30 Minuten beendet,¹ dabei wurden 45790 Simulationsläufe ausgeführt. Ein einzelner Simulationslauf ist deshalb mit durchschnittlich etwas mehr als einer Viertelsekunde relativ schnell durchgeführt. Dabei blieb der verwendete Arbeitsspeicher nahezu konstant (maximal 12MB). Eine vorherige Simulation mit deutlich veränderter Abbruchbedingung (lediglich Vergleich mit bekanntem Optimum - siehe Unterabschnitt 4.1.5) war nach 20 Stunden und über 220000 Läufen noch nicht ein mal halb beendet. Auch hier blieb die Nutzung des Arbeitsspeichers aber sehr gering. Es lagen bereits Warteanweisungen für über 450000 Läufe vor, weitere wären vermutlich noch hinzugekommen. Aus diesem Grund wurde die Bewertungsfunktion angepasst und die Ergebnisse wurden, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, für viele Züge nicht optimal. Ein weiteres Problem ergab sich aus der Anzahl der Simulationsläufe auch durch die Protokolldateien. Für den beschriebenen Testfall wurden die Trace-Dateien jeweils etwa 1,4MB und die Textdateien jeweils 650KB groß (die Warteanweisungen liegen noch unter einem KB). Deshalb wurden die hauptsächlich zur Evaluierung (Lesbarkeit der Zeiten) vorhandenen Textdateien abgeschaltet. In der Summe macht das für die beschränkte Simulation immer noch etwa 64GB, für die vorherige Fassung wären also mindestens zehn mal so viele Daten ange-

¹In einer virtuellen Maschine mit einem Kern mit 3Ghz und 1,5GB Arbeitsspeicher sowieso Zugriff auf die Festplatte des Hosts.

fallen und bereits beim Lesen der bis dahin erzeugten globalen Statistik (bei verkürztem Lauf 164MB) gab es Probleme beim Öffnen.

Die Einbringung eines tatsächlichen Betriebszustandes zur Lösung einer konfliktbehafteten Situation lässt sich weiterhin derzeit nicht einfach realisieren, da die Simulation der Fahrten blockweise diskretisiert ist. Die zeitkritische Anwendung der Konfliktlösung kann zurzeit sowieso ausgeschlossen werden. Neben den genannten Problemen bei der Optimierung der dispositiven Entscheidungen und der Verwendbarkeit lässt sich ein massives Ausführungszeit- und Speicherplatzproblem erkennen. Dieses wird vorrangig durch die Anzahl an Wiederholungen ausgelöst, welche mit der Zahl der Züge exponentiell steigt. Auf mögliche Lösungen des Problems wird deshalb im folgenden Abschnitt eingegangen.

5.3. Ausblick / Erweiterungen

Durch die hohe Anzahl an Simulationsläufen stellt sich zuerst die Frage, wie diese reduziert werden könnten. Dabei gäbe es verschiedene Ansätze, welche gleichzeitig ggf. eine Verbesserung der Abbruchheuristik und damit eine höhere Qualität bei der Suche nach dem Optimum bedeuten könnten. Ein Ansatz wäre die Festlegung notwendiger Kriterien für Konflikte, die neue Warteanweisungen erzeugen. Derzeit wird bei jedem Belegungskonflikt, der nach der für den Simulationslauf festgelegten Zeitschranke stattfindet, eine weitere Warteanweisung ausgegeben. Eine Beschränkung auf „sinnvolle“ Überholungen wäre zu bevorzugen. Hier böten sich unterschiedliche Kriterien an. Ein Vergleich der Zug-Arten wäre ein erster Ansatz zur Berücksichtigung von Prioritäten. Derzeit kommt es z. B. auch zu Warteanweisungen zwischen Regional- und Fernverkehr zu Gunsten des Regionalverkehrs, da der Fernverkehrszug ggf. ebenfalls verbogen wurde und so die Fahrt des Regionalzuges behindert. Dies würde allerdings weitere Eingabedaten erfordern, welche die Prioritäten beschreiben. Will man die Prioritäten nicht betrachten, wäre eine Prognose des potentiellen Verlaufs beider Zeit-Weg-Linien (also z. B. der prognostizierten Durchschnittsgeschwindigkeit) als weiterer Ansatz denkbar. Damit wäre es ggf. möglich, Warteanweisungen nur dann zu erzeugen, wenn sich überhaupt signifikante Vorteile bei der Fahrzeit oder dem Energieverbrauch ergeben könnten. Da nach Ende eines Simulationslaufs alle Verspätungen bekannt sind, kann beim Konflikt zwischen zwei Zügen auch eine Bewertung beider Verspätungen stattfinden. Einen Zug überholen zu lassen, wenn dieser auch ohne Überholung nur geringe Verspätungen aufweist, würde damit vermieden werden.

Ein trivialer weiterer Ansatz, die Zahl der Warteanweisungen zu reduzieren, liegt in der Begrenzung des Betrachtungshorizonts. Derzeit wird ein gesamter Kalendertag simuliert und alle auftretenden Konflikte bearbeitet. Der selbe Ansatz, der die in jedem Simulationslauf frühest-mögliche neue Warteanweisung festlegt, kann auch eine obere Zeitgrenze kontrollieren. So reduziert sich die Zahl der Warteanweisungen im selben Szenario auf lediglich 2098 Simulationsläufe in knapp neun Minuten, wenn die Zeit für

5. Auswertung

die Erzeugung von Warteanweisungen auf 17 bis 20 Uhr begrenzt wurde. Ein Versuch mit der (für den in Abschnitt 5.3 betrachteten IC 2175) kritischen Zeit ab 20 Uhr war bereits nach 1975 Simulationsläufen in etwa 8,5 Minuten beendet und enthielt dabei u. a. den beschriebenen Überholvorgang.

Ursache des Problems der vielen Simulationsläufe ist aber ebenso die geringe Qualität der Eingabedaten. Bei einem vollständigeren Fahrplan mit bereits vorgegebenen Warteanweisungen wäre die Bearbeitung einzelner auftretender Konflikte in fast allen möglichen Varianten denkbar, da die Gesamtzahl der Konflikte vermutlich drastisch reduziert wäre. Eine mögliche Erweiterung bei einem konfliktfreien Fahrplan als Eingabe wäre dann die Berücksichtigung von statistisch verteilten Einbruchs- und Unterwegsverspätungen. Die so berechneten Verspätungen müssten allerdings (z. B. als zusätzliche Daten im internen Fahrplan) teilweise gespeichert werden, da sich die Reihenfolge der Fahrten über die Simulationsläufe verändert. Eine erhöhte Fahrgastwechselzeit etwa kann entweder für alle Züge zu einer bestimmten Uhrzeit an einem Bahnhof ein Problem darstellen oder nur für bestimmte Züge. Dabei stellt sich dann die Frage, ob diese Art von Konflikten vorausschauend gelöst werden darf, da sie nicht vorhersehbar sind. Die Möglichkeit der statistisch erzeugten Störungen wurde aufgrund der Probleme mit der Ausführungszeit nicht näher untersucht.

Eine allgemeine Maßnahme zur Reduktion der Ausführungszeit wäre die Parallelisierung von Simulationsläufen. Die Unabhängigkeit der Läufe ermöglicht potentiell eine zeitgleiche Ausführung. Da SLX diese Möglichkeit nicht bietet, müsste eine Aufteilung über mehrere SLX-Instanzen erfolgen. Die auszutauschenden Daten liegen in hohem Maße bereits jetzt als Dateien vor (Warteanweisungen), womit die Synchronisation und der Datenaustausch der Instanzen sich hauptsächlich auf die Aufteilung und Nummerierung von Simulationsläufen begrenzt. Das Abbruchkriterium für schlecht bewertete Simulationsläufe müsste allerdings verändert oder deaktiviert werden, da es Werte von vorherigen Simulationsläufen voraussetzt. Denkbar wäre etwa die Beschränkung auf den Vergleich des aktuellen Simulationslaufs mit dem erzeugenden Lauf. Die dafür notwendigen Daten könnten z. B. zu den Warteanweisungen hinzugefügt werden. Wenn jede Instanz ihre eigene tabellarische Übersicht (glob.txt) schreiben würde (eine spätere Zusammenfassung wäre trivial), wäre auch hier keine Synchronisation notwendig.

Weiterhin stellt sich die Frage nach einer detaillierteren Netzabbildung z. B. über eine Nachbildung von Netzelementen wie Basilen (siehe Unterabschnitt 2.1.5). Die Nachbildung der Zugbeeinflussung über Basilen würde die Modellzeitschritte zur Berechnung der Fahrten verringern. In Zusammenhang mit der Modellierung einer vorausschauenden Fahrweise (vgl. LZB) würden dann auch kleinere Blöcke möglich werden. Derzeit muss ein Blockabschnitt wie bei der punktförmigen Zugbeeinflussung mindestens den notwendigen Bremsweg zur Verfügung stellen. Mit kleineren Streckenabschnitten könnten weiterhin auch komplexere Strukturen und Fahrten nachgebildet werden, wie etwa Gleiswechsel unabhängig von den bisherigen Block- oder Streckenpunkten. Auch

die Abbildung zulässiger Gleiswechsel vor oder nach einem Bahnhof, um den nach Bahnhofsfahrordnung vorgegebenen Bahnsteig zu erreichen, wäre damit möglich. Derzeit würden bei einem zweigleisigen Modellnetz die Züge voneinander unabhängig in den Bahnhof einfahren und ein Flankenschutz (siehe [23]) wäre nicht oder nur sehr grob etwa über einen vorgelagerten eingleisigen Abschnitt abbildbar. Eine detaillierte Abbildung des Netzes und der Fahrten und die damit einhergehende Verlängerung der Ausführungszeit eines Simulationslaufs hat dabei nur linearen Einfluss auf die gesamte Ausführungszeit (abgesehen von ggf. zusätzlich erkannten Konflikten).

Ein weiteres Detail der vorausschauenderen Fahrweise wäre die Einbringung einer zusätzlich möglichen Phase der Fahrt, die dem Ausrollen entspricht. Diese besonders energiesparende Fahrweise (siehe [17]) ist allerdings nur bei ausreichender Betrachtung folgender Abschnitte sinnvoll, da die Geschwindigkeit nur langsam reduziert wird.

6. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine effektive Art der vereinfachten Betriebssimulation verschiedener Dispositions-Szenarien geschaffen. Die Überholung von Zügen im Konfliktfall wurde erfolgreich umgesetzt und die Ausgabe ermöglicht eine abschließende Analyse der durchgeführten Simulationsläufe. Der Überblick über einen ganzen Tag ist im Anhang A.3 dargestellt und erlaubt die visuelle Wahrnehmung von kritischen Zugdichten und Konflikten. Weiterhin sind dort Lücken erkennbar, welche die Planung und Einsetzung zusätzlicher Fahrten ermöglichen.

Das entwickelte Verfahren zur Simulation verschiedener dispositiver Eingriffe ließe sich somit derzeit z. B. als unterstützende Anwendung bei der Erstellung oder Bearbeitung von Fahrplänen verwenden. Unter Auslassung der automatischen Erstellung von dispositiven Eingriffen könnten verschiedene Szenarien von Eingriffen durch eine andere Anwendung vorgegeben und mit geringer Ausführungszeit simuliert werden.

Durch Mängel bei der Effizienz und der Genauigkeit der Modellierung lässt sich bislang nicht jede Zugfahrt hinreichend optimieren und eine Optimierung des Energieverbrauchs ist durch unzureichend vorausschauende Fahrweisen nicht vollständig umsetzbar. Mit den genannten Erweiterungen ließe sich jedoch das erstellte Simulationsmodell als Basis für eine verbesserte Betriebssimulation verwenden. Die Erweiterungen wären dabei jeweils mit angemessenem Aufwand umsetzbar, da ihre Auswirkungen sich auf einzelne Methoden oder Module (Bewertung, Fahrtberechnung, Netz) beschränken würden.

A. Anhang

A.1. Berechnung der maximal möglichen Varianten

Illustrieren lässt sich die obere Schranke am Einfügen einer Zugfahrt in einen vorhandenen Fahrplan. Mit dem ersten Bahnhof kann die Fahrt auf allen $n + 1$ (n sei die Anzahl bereits geplanter Züge) Positionen vor oder nach anderen Zugfahrten liegen. Mit Warten dieses Zuges oder anderer Züge am folgenden Bahnhof, kann die Reihenfolge wieder zwischen den $n + 1$ Möglichkeiten wechseln, auch wenn dies aufgrund von Warte- und Fahrzeiten sowieso der Anzahl von Stellplätzen nicht realistisch ist. Für eine vorhandene Variante entstehen damit $(n + 1)^b$ (b sei die Anzahl der Bahnhöfe) weitere Möglichkeiten beim Hinzufügen einer Fahrt.

b : Anzahl an Bahnhöfen (unendlich groß)

n : Anzahl an Zügen

$\#(n, b)$: Anzahl an Varianten

Annahme : $\#(n, b) = (n!)^b$

Für $n = 1$: $\#(n, b) = (n!)^b = 1$

Für $n \rightarrow n + 1$: $\#(n + 1, b) = ((n + 1)!)^b$

$$= (n + 1)^b * (n!)^b$$

$$= \#(n, b) * (n + 1)^b$$

□

A.2. Berechnung der notwendigen Geschwindigkeit

Als Annahmen gelten, dass die notwendige Geschwindigkeit kleiner/gleich der Maximalgeschwindigkeit und größer/gleich der Minimalgeschwindigkeit des aktuellen Geschwindigkeitsintervalls ist. Das lässt sich einfach durch überprüfen beider Werte (ggf. bei der vorherigen Beschleunigungsphase) sicherstellen. Weiterhin ist (nur) eine Bremsung bis zur aktuellen Geschwindigkeit notwendig, da vorher bereits an Fahrzeit und Reststrecke die für die Bremsung aus der aktuellen Geschwindigkeit anfallenden Zeiten und Wege abgezogen wurden. Auf diese Art kann die gleiche Berechnung für

A. Anhang

unterschiedliche Geschwindigkeiten am Streckenende verwendet werden (ggf. eingeschränkte erlaubte Geschwindigkeit) und nicht nur für den vollständigen Halt.

t_f : Zeit die zur Verfügung steht

s_f : Reststrecke

a_b : Beschleunigung beim Bremsen (< 0)

a : Beschleunigung

v_0 : Geschwindigkeit aktuell

v_1 : Zielgeschwindigkeit ($> v_0$)

t_a : Zeit mit Beschleunigung

t_b : Zeit mit Bremsung

t_v : Zeit mit Verharren

$$t_a = \frac{v_1 - v_0}{a}$$

$$t_b = \frac{v_0 - v_1}{a_b}$$

$$t_f = t_v + t_a + t_b$$

$$s_f = \frac{v_0 + v_1}{2} * t_a + v_1 * t_v + \frac{v_0 + v_1}{2} * t_b$$

| Einsetzen t_a, t_b, t_v

$$= \frac{-(v_0^2 - v_1^2)}{2 * a} + v_1 * \left(t_f - \frac{v_0 - v_1}{a_b} - \frac{v_1 - v_0}{a} \right) + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2 * a_b} \quad | - s_f$$

$$0 = \frac{-(v_0^2 - v_1^2)}{2 * a} + v_1 * \left(t_f - \frac{v_0 - v_1}{a_b} - \frac{v_1 - v_0}{a} \right) + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2 * a_b} - s_f \quad | * 2 * a * a_b$$

$$= (a - a_b) * (v_0^2 - v_1^2) + 2 * a * a_b * \left(v_1 * \left(t_f - \frac{v_0 - v_1}{a_b} - \frac{v_1 - v_0}{a} \right) - s_f \right) \quad | / (a - a_b)$$

$$= -v_1^2 + \frac{2 * a * a_b * \left(v_1 * \left(t_f - \frac{v_0 - v_1}{a_b} - \frac{v_1 - v_0}{a} \right) - s_f \right)}{a - a_b} + v_0^2$$

$$= -v_1^2 + \frac{2 * (a * a_b * (v_1 * t_f - s_f) - v_1 * (a - a_b) * (v_0 - v_1))}{a - a_b} + v_0^2$$

$$= -v_1^2 + 2 * \left(\frac{(a * a_b * (v_1 * t_f - s_f))}{a - a_b} + v_1 * (v_1 - v_0) \right) + v_0^2$$

$$= v_1^2 + 2 * \left(\frac{(a * a_b * (v_1 * t_f - s_f))}{a - a_b} - v_1 * v_0 \right) + v_0^2$$

$$= v_1^2 + 2 * \left(\underbrace{\frac{a * a_b * t_f}{a - a_b}}_p - v_0 \right) * v_1 + v_0^2 - \underbrace{\frac{2 * a * a_b * s_f}{a - a_b}}_q$$

A.2. Berechnung der notwendigen Geschwindigkeit

$$v_1 = v_0 - \frac{a * a_b * t_f}{a - a_b} \pm \sqrt{\left(v_0 - \frac{a * a_b * t_f}{a - a_b}\right)^2 + \frac{2 * a * a_b * s_f}{a - a_b} - v_0^2}$$

Ist die erlaubte Geschwindigkeit am Streckenende größer als notwendig, entfällt die Bremsung und eine deutlich einfachere Rechnung ist nötig. Die Berechnung gilt nur, wenn die aktuelle Geschwindigkeit kleiner als zum pünktlichen Erreichen nötig ist und dafür ausreichend Zeit ist.

$$\begin{aligned}
 t_f &= t_v + t_a \\
 s_f &= \frac{v_0 + v_1}{2} * t_a + v_1 * t_v && | \text{Einsetzen } t_a, t_v \\
 &= \frac{-(v_0^2 - v_1^2)}{2 * a} + v_1 * \left(t_f - \frac{v_1 - v_0}{a}\right) && | - s_f \\
 0 &= \frac{-(v_0^2 - v_1^2)}{2 * a} + v_1 * \left(t_f - \frac{v_1 - v_0}{a}\right) - s_f && | * 2 * a \\
 &= -(v_0^2 - v_1^2) + 2 * a * \left(v_1 * \left(t_f - \frac{v_1 - v_0}{a}\right) - s_f\right) \\
 &= v_1^2 + 2 * (v_1 * (a * t_f - (v_1 - v_0)) - (a * s_f)) - v_0^2 \\
 &= v_1^2 + 2 * (v_1 * a * t_f - v_1 * (v_1 - v_0) - (a * s_f)) - v_0^2 \\
 &= v_1^2 + 2 * (a * t_f * v_1 - v_1^2 + v_0 * v_1 - a * s_f) - v_0^2 \\
 &= v_1^2 - \underbrace{2 * (a * t_f + v_0) * v_1}_p + \underbrace{2 * a * s_f + v_0^2}_q \\
 v_1 &= a * t_f + v_0 \pm \sqrt{(a * t_f + v_0)^2 - 2 * a * s_f - v_0^2}
 \end{aligned}$$

Beide Gleichungen haben unter den genannten Voraussetzungen zwei positive Lösungen. Die kleinere Lösung ist dabei zu verwenden. Die größere Lösung wird in beiden Fällen durch eine mathematisch mögliche, physikalisch unmögliche Fahrt erreicht. Die Beschleunigung (und ggf. Bremsung) wird dabei über das vorgegebene Zeit- und Streckenende hinaus durchgeführt und durch eine negative Verharrzeit (und damit auch eine negative Fahr-Strecke mit Verharrgeschwindigkeit) kompensiert. Zur Vorstellung des ersten Falles kann Abbildung 4.4 dienen, die Beschleunigungsphase schneidet sich dann oberhalb des gezeigten Verlaufs mit der Bremsphase und der sich ergebende Verlauf würde einer Sanduhr ähneln.

Im Falle einer Bremsung, um nicht vor Plan am Zielpunkt anzukommen, ist die zweite Gleichung ebenso anzuwenden. Hier existieren dann allerdings eine negative und eine positive Lösung, da die Beschleunigung negativ ist. In dem Fall ist selbstverständlich die positive Lösung zu wählen.

A.3. Proof Animation

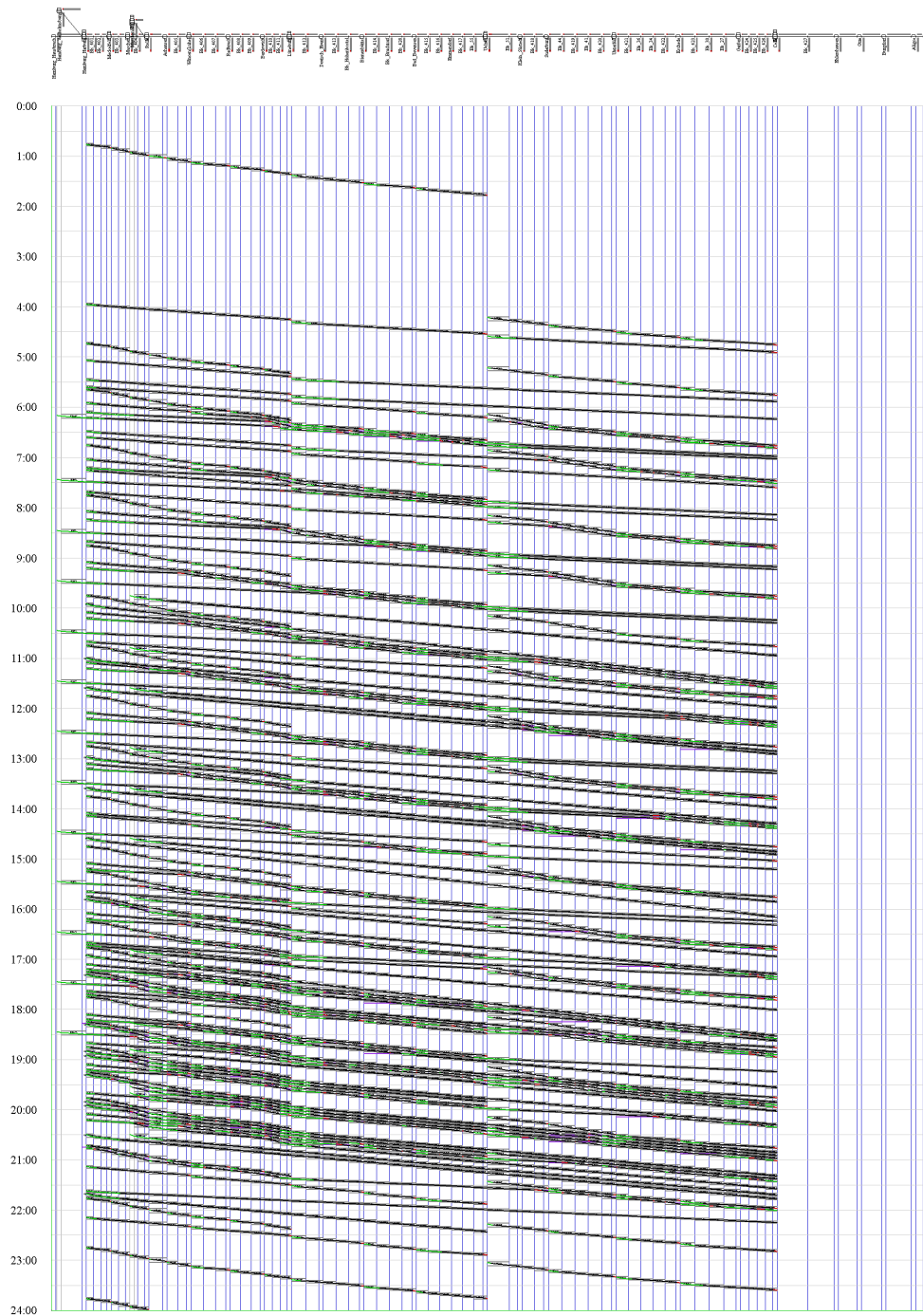


Abbildung A.1.: Proof: Ausgabe über einen Kalendertag (ohne Überholungen)

A.4. Inhaltsverzeichnis der CD

/ SLX/	input/	fahrten.txt	Eingabedaten
		netz.txt	
		profile.txt	
		punkte.txt	
		warten.txt	
		warten_ab20Uhr.txt	alternat. Startanweisung (ab 20 Uhr)
		zuege.txt	Eingabedaten
	FBS/	Güter-mitReserven.txt	Vorlagen der Fahrprofile aus FBS
		Güter-ohneReserven.txt	
		ICE-T-mitReserve.txt	
		ICE-T-ohneReserve.txt	
		IC-mitReserve.txt	
		IC-ohneReserve.txt	
		RE-mitReserven.txt	
		RE-ohneReserven.txt	
	24Stunden_part.zip		Teile der Ausgabe (vollst. Bearbeitung) ¹
	ab20Uhr.zip		vollst. Ausgabe (Bearbeitung ab 20 Uhr)
	fahrzeit.slx		Simulationsmodell
	fahrzeitClasses.slx		
	netz.slx		
	netzClasses.slx		
	outext.slx		
	simulation.slx		
	zuege.slx		
	zuegeClasses.slx		
	Diplomarbeit.pdf		

¹ Enthält alle Ausgaben, aber nur die analysierten Trace-Dateien

Tabelle A.1.: Inhalt der CD

Literaturverzeichnis

- [1] BIEDERBICK, Claus: *Computergestützte Disposition im schienengebundenen Personentransport – ein kundenorientierter Ansatz*, Universität Paderborn, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 2006. – URL <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/download/pdf/4843?originalFilename=true>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [2] BÜKER, Thorsten: *Ausgewählte Aspekte der Verspätungsfortpflanzung in Netzen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation, 2010. – URL <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2011/3469/pdf/3469.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [3] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. Juli 2012. – URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ebo/gesamt.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [4] DEUTSCHE BAHN AG: *10-Jahres-Übersicht*. – URL http://www1.deutschebahn.com/file/6455068/data/2013_10Jahresuebersicht.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [5] DEUTSCHE BAHN AG: *Elektronisches Kursbuch*. – URL <http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [6] DEUTSCHE BAHN AG: *Eingeschränkter Zugverkehr im Hauptbahnhof Mainz in den nächsten Wochen*. August 2013. – URL http://www.deutschebahn.com/de/presse/pi_regional/4286166/hrps20130808.html. – Zugriffsdatum: 28.04.2014. – Presseinformation
- [7] DLR - INSTITUT FÜR KOMMUNIKATION UND NAVIGATION: *Precise and integer Localisation and Navigation in Rail and Inlandwater Traffic*. – URL http://www.dlr.de/kn/desktopdefault.aspx/tabid-4307/6939_read-29574/. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [8] EICKMANN, Dr. C. ; KOHLRUSS, Jacob ; SCHUMANN, Tilo: *HAFENHINTERLAND-ANBINDUNG – SINNVOLLE KOORDINATION VON MASSNAHMEN IM SCHIENENVERKEHR ZUR BEWÄLTIGUNG DES ZU ERWARTENDEN VERKEHRSAUFGKOMMENS*. 2008. – URL http://www.y-nein.de/Gutachten_DLR_lang.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014. – Abschlussbericht

- [9] EU-KOMMISSION: *Aktenzeichen C(2006) 5211*. November 2006. – URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006D0860&from=EN>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014. – Technische Spezifikation für die Interoperabilität...
- [10] EVESLAGE, Ingmar: *Simulation selbstorganisierender Erdbebenfrühwarnsysteme unter Einbindung eines Geoinformationssystems*, Humboldt Universität zu Berlin, Diplomarbeit, 2008. – URL http://www2.informatik.hu-berlin.de/Institut/struktur/systemanalyse/zweckverband/Eveslage_DA_2008.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [11] FISCHER, Prof. Dr. J.: *Kurs OMSI - Objektorientierte Simulation mit ODEmX*. 2009. – Foliensatz
- [12] FLIER, Holger-Frederik R.: *Optimization of Railway Operations - Algorithms, Complexity, and Models*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Dissertation, 2011. – URL <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:5241/eth-5241-02.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [13] GERSTENBERGER, Ralf: *ODEmX - Neue Lösungen für die Realisierung von C++ Bibliotheken zur Prozesssimulation*, Humboldt Universität zu Berlin, Diplomarbeit, 2003. – URL <http://www2.informatik.hu-berlin.de/Institut/struktur/systemanalyse/zweckverband/gerstenberger2003.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [14] GRÖGER, Thomas A.: *Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation, 2002. – URL http://sylvestor.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/206/02_206.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [15] HÜRLIMANN, Daniel: *Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Dissertation, 2001. – URL <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24236/eth-24236-02.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [16] JACOBS, Jürgen: *Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation, 2003. – URL http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2003/548/pdf/Jacobs_%20Juergen.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [17] LINDER, Ulrich: *Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung*, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschi-

- nensysteme, Dissertation, 2004. – URL http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/796/linder_ulrich.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [18] M. HECHT, Th. R.: *Telematik im Schienengüterverkehr – Anwendung bei Gefahrguttransporten*. 2000. – URL http://www.schiene-fzg.tu-berlin.de/fileadmin/fg62/pdf/veroeffentlichung_gl.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [19] MASCHKE, Ulrich: *Sicherung des Schienenverkehrs - Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik*. Vieweg+Teubner, 2012. – ISBN 978-3-8348-2070-9
- [20] MATTERN, Friedemann: Modellbildung und Simulation. In: WILHELM, Reinhard (Hrsg.): *Informatik - Grundlagen, Anwendungen, Perspektiven*. C.H. Beck, 1996, S. 56–64. – URL http://vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Mod_Sim.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [21] MINUTEMAN SOFTWARE: *GPSS World Reference Manual*. – URL http://www.minutemansoftware.com/reference/reference_manual.htm. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [22] ODEMX. – URL <https://samtrac.informatik.hu-berlin.de/ODEMX-git>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014. – trac - git
- [23] PACHL, Jörg: *Systemtechnik des Schienenverkehrs - Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. Bd. 5. Vieweg+Teubner, 2008. – ISBN 978-3-8351-0191-3
- [24] PROF. DR. PROKOP, André: *Der Güterverkehr von morgen*. – URL http://www.boell.de/sites/default/files/Gueterverkehr_von_Morgen.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [25] SCHAER, T ; BISSANTZ, N ; GÜTTLER, S ; JACOBS, J ; KURBY, S ; SCHÖBEL, Anita ; SCHOLL, S: DisKon-Disposition und Konfliktlösungsmanagement für die beste Bahn. In: *Grenzenloser Verkehr in einem grenzenlosen Europa: Verkehrswissenschaftliche Tage, 19. und 20. September 2005 in Dresden= Boundless traffic in a boundless Europe* (2005). – URL <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?gs-1/5716>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [26] SCHMIDT, Christine: *Beitrag zur experimentellen Bestimmung der Wartezeitfunktion bei Leistungsuntersuchungen im spurgeführten Verkehr*, Universität Stuttgart, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Dissertation, 2009. – URL http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/3994/pdf/Dissertation_Schmidt.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [27] SCHULZE, Thomas ; HENRIKSEN, James: *Simulation Needs SLX*. 2002. – URL <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/pelo/sa/SimulationNeedsSLX.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014

- [28] SCHUMANN, Tilo: *PiLoNav OVM-Tool Beschreibung*. November 2012. – Unveröffentlichter Entwurf
- [29] SELLIEN, Roland: *Hochleistungsschienennetz für Niedersachsen, Bremen und Hamburg statt Y-Trasse - Eine systematische Betrachtung*. 2003. – URL <http://www.y-nein.de/y-trasse%20sellien.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [30] UMWELTBUNDESAMT: *Schienennetz 2025 / 2030 - Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland*. 2010. – URL <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4005.pdf>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [31] WOLVERINE SOFTWARE: *Webseite*. – URL <http://wolverinesoftware.com/>. – Zugriffsdatum: 28.04.2014
- [32] WUSTROW, Sören: *Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Bahnbetriebes mit planerischen Zugfolgezeiten*, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation, 2009. – URL http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/2279/wustrow_soeren.pdf. – Zugriffsdatum: 28.04.2014

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Weiterhin erkläre ich, eine Diplomarbeit in diesem Studienggebiet erstmalig einzureichen.

Berlin, den 11.05.14

.....

Einverständniserklärung

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass die vorliegende Arbeit in der Bibliothek des Institutes für Informatik der Humboldt-Universität ausgestellt werden darf.

Berlin, den 11.05.14

.....